



СГУГиТ

СИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Вестник СГУГиТ

Научный журнал
Издается с 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Том 23, № 4, 2018

Главный редактор

Д. т. н., проф. А. П. Карпик

Заместители главного редактора:

Д. т. н., проф. Д. В. Лисицкий

Д. т. н., проф. И. В. Минин

Редакционная коллегия:

Д. б. н. К. С. Байков

Д. б. н., проф. Ю. В. Кравцов

Акад. РАН Н. П. Похиленко

Чл.-кор. РАН В. П. Савиных

Д. г. н., проф. В. С. Тикунов

Д.ф.-м.н., проф. В. Ю. Тимофеев

Д. т. н., проф. Л. К. Трубина

Д. т. н., проф. Ю. В. Чугуй

Акад. РАН М. И. Эпов

Международный

редакционный совет:

К. т. н., доц. Г. Гиенко (США)

Д. т. н., проф.

С. Златанова (Нидерланды)

Д. т. н., проф. М. Конечны (Чехия)

Д. ф.-м. н., проф.

С. М. Копейкин (США)

К. т. н., доц. Е. Левин (США)

Д. т. н., проф. Х. Маттсон (Швеция)

Д. т. н., проф. Р. В. Шульц (Украина)

Д. т. н., проф. Р. Ягер (Германия)

До 2015 г. журнал выходил
под названием «Вестник СГГА»

С 2017 г. нумерация журнала
включает номер тома
(порядковый номер года издания)
и номер выпуска в текущем году

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

- О. Г. Бесимбаева, Е. Н. Хмырова, Е. А. Олейникова, Р. Р. Ханнанов.* Технология автоматизированного проектирования железных дорог с использованием цифровых и математических моделей местности..... 5
- Е. Г. Гиенко.* Уточнение датирования и особенностей функционирования астроархеологических памятников по астрономо-геодезическим данным 19
- А. В. Доброхотов.* Определение пространственного распределения суммарной радиации в зависимости от типов и количества облачности с использованием спутниковых данных фактора мутности Линке и цифровой модели рельефа..... 33
- Ю. О. Кузьмин.* Идентификация результатов повторных геодезических наблюдений при оценке геодинамической опасности объектов недропользования 46
- Ю. О. Кузьмин, Е. А. Фаттахов.* Анализ повторных нивелирных наблюдений в зонах разломов методами теории деформаций..... 67
- В. А. Середович, А. В. Середович, А. В. Иванов, А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина.* Комбинированный метод определения деформаций Бугринского моста при его испытаниях..... 85
- А. Н. Соловицкий.* Функциональное зонирование – инструмент управления развитием геодинамического полигона при изучении геодинамики земной коры..... 100
- Г. А. Уставич, В. А. Скрипников, Н. М. Рябова, М. А. Скрипникова.* Особенности применения элеваторов высот для определения тепловых деформаций системы «Турбоагрегат – фундамент – основание»..... 110
- А. В. Устинов.* Результаты мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания на опытном участке Загорской ГАЭС-2 128

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-62654 от 10.08.2015

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Подписные индексы в каталогах:

«Пресса России» – 43809
Электронный каталог «Российская периодика» (www.ideg.ru) – 43809э

Технический редактор журнала
А. В. Конева

Адрес редакции:
630108, Новосибирск,
ул. Плахотного, 10, к. 436
E-mail: vestnik@ssga.ru
Тел. (383)361-06-55
http://vestnik.ssga.ru

Перевод на английский язык
Д. В. Романова

Редактор
Е. К. Деханова

Компьютерная верстка
К. В. Ионко
Н. Ю. Леоновой

Подписано в печать 17.12.2018.
Формат 70 × 100 1/16.
Усл. печ. л. 22,25.
Тираж 1 000 экз. Заказ 204.

Редакционно-издательский
отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск,
ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной
лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск,
ул. Плахотного, 8.

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

- А. Н. Бешенцев, Д. Г. Будаева, Э. Д. Санжеев, А. А. Лубсанов, Т. А. Борисова, Э. А. Батоцыренов.* Сущность и картографирование туристско-рекреационного информационного пространства: побережье озера Байкал.... 142
- П. Ю. Бугаков, С. Ю. Кацко, А. А. Басаргин, Е. Ю. Воронкин.* Анализ функциональных возможностей веб-приложения Kepler.gl для визуализации и анализа больших наборов пространственных данных 155
- С. Р. Горобцов, А. В. Чернов.* Трехмерное моделирование и визуализация городских территорий с использованием современных геодезических и программных средств..... 165

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

- Е. И. Аврунев.* О стабильности геопространства и технологических аспектах его контроля 180
- Т. Н. Жигулина, В. А. Мерецкий, Д. А. Воробьев, А. О. Киселева.* Закономерности развития кадастровой системы государства 190
- В. Н. Ключниченко.* Приостановления и отказы в проведении государственного кадастрового учета недвижимого имущества 203

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- В. Б. Жарников, Ю. С. Ларионов.* О плодородии почв и его мониторинге в системе биоземледелия 212
- И. В. Михеева, А. А. Оплеухин.* Идентификация вероятностно-статистических моделей свойств экологических систем и их информационная оценка 226
- А. П. Мохирев, М. М. Герасимова, С. О. Медведев.* Нахождение маршрута минимальной стоимости транспортного пути при доставке древесины с лесосеки 249
- П. И. Муллаярова, О. Н. Николаева, Л. К. Трубина.* Геоэкологическая оценка и картографирование состояния озелененных территорий специального назначения 262

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

- К 70-летию В. И. Татаренко, профессора, почетного работника высшей школы РФ, почетного работника геодезии и картографии 275



SSUGT
SIBERIAN STATE
UNIVERSITY OF GEOSYSTEMS
AND TECHNOLOGIES

Vestnik SSUGT

Scientific journal
Published since 1996
Issued 4 times a year

Volume 23(4), 2018

Editor-in-Chief:

D. Sc. (Eng.), Prof. A. P. Karpik

Depute Editor-in-Chief:

D. Sc. (Eng.), Prof. D. V. Lisitsky
D. Sc. (Eng.), Prof. I. V. Minin

Editorial team:

D. Sc. (Biol.) K. S. Baikov
D. Sc. (Eng.), Prof. Yu. V. Kravtsov
Member of RAS N. P. Pokhilenko
Corresp. Member of RAS
V. P. Savinykh
D. Sc. (Geogr.), Prof. V. S. Tikunov
D. Sc. (Phys.-Math.) V. Yu. Timofeev
D. Sc. (Eng.), Prof. L. K. Trubina
D. Sc. (Eng.), Prof. Yu. V. Chugui
Member of RAS M. I. Epov

International editorial board:

Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.
G. Gienko (USA)
D. Sc. (Eng.), Prof.
S. Zlatanova (Netherlands)
D. Sc. (Eng.), Prof.
M. Konečný (Czech Republic)
D. Sc. (Phys.-Math.), Prof.
S. M. Kopeikin (USA)
Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof.
E. Levin (USA)
D. Sc. (Eng.), Prof.
H. Mattsson (Sweden)
D. Sc. (Eng.), Prof.
R. V. Shults (Ukraine)
D. Sc. (Eng.), Prof.
R. Jäger (Germany)

Before 2015 journal
was published under the name
«Vestnik SSGA»

Starting from 2017 numbering of the
volume refers to the number of years
the journal has been circulated. The
number of the issue refers to how
many times the journal was published
during the year

© SSUGT, 2018

CONTENTS

GEODESY AND MINE SURVEY

- O. G. Besimbaeva, E. N. Khmyrova, E. A. Oleynikova, R. R. Hannanov.* Technology of Automated Designing of Railways with the Use of Digital and Mathematical Models of Locality 5
- E. G. Gienko.* Refinement of Astroarchaeology Monuments Dating and Functioning by Astronomic-Geodetic Data..... 19
- A. V. Dobrokhotov.* Estimation of the Global Radiation Spatial Distribution Depending on Forms and Amount of Clouds with the Satellite Data of Linke Turbidity Coefficient and Digital Elevation Model 33
- Yu. O. Kuzmin.* Identification of Results of Repeated Geodesic Observations at the Estimation of the Geodynamic Hazard of Subsurface Objects 46
- Yu. O. Kuzmin, E. A. Fattakhov.* Analysis of Observation Repeated Leveling in Fault Zones Methods of Deformation Theory 67
- V. A. Seredovich, A. V. Seredovich, A. V. Ivanov, A. A. Sholomitskii, E. K. Lagutina.* Combined Method for Determining of the Bughrin Bridge Deformations During its Tests 85
- A. N. Solowitskiy.* Functional Zoning – a Tool For Managing the Development of Geodynamic Polygon in the Study of the Earth Crust Geodynamics 100
- G. A. Ustavich, V. A. Skripnikov, N. M. Ryabova, M. A. Skripnikova.* Specific Aspects of Height Elevation Tools Used for Determination of Heat Deformations in System "Turbogenerator–Foundation–Ground" 110
- A. V. Ustinov.* The Results of the Monitoring of Vertical Displacements in the Process of Compensation Grouting at the Experimental Site of Zagorskaya PSP-2 128

Registration certificate

PI № FS 77-62654 of 10.08.2015

The journal is included in the List of refereed scientific journals, recommended by HAC for publishing the scientific results of dissertations in candidacy for a degree of Candidate or Doctor of Science degree

Journal included in Russian Science Citation Index (RSCI)

Subscription indexes in catalogues:

«Russian press» – 43809

Electronic catalogue

«Russian periodicals»

(www.ideg.ru) – 43809

Layout editor of journal

A. V. Koneva

Reduction address:

630108, Novosibirsk,

10 Plakhotnogo St., r. 436

E-mail: vestnik@ssga.ru

Phone: (383)361-06-55

http://vestnik.ssga.ru

English translation

D. V. Romanov

Editor

E. K. Dehanova

Desktop publishing

K. V. Ionko

N. Yu. Leonova

Signed to print 17.12.2018.

Format 70 × 100 1/16.

Conv. pr. sheets 22,25.

Circulation 1 000 copies.

Order 204.

Printing and publication

department SSUGT

630108, Novosibirsk,

10 Plakhotnogo St.

Printed in map printing

laboratory SSUGT

630108, Novosibirsk,

8 Plakhotnogo St.

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

A. N. Beshentsev, D. G. Budaeva, E. D. Sanzheev, A. A. Lubsanov, T. A. Borisova, E. A. Batotsyrenov. Essence and Mapping of Tourist-Recreational Information Space: the Coast of Lake Baikal 142

P. Yu. Bugakov, S. Yu. Katsko, A. A. Basargin, E. Yu. Voronkin. Analysis of the Functionality of the Web Application Kepler.GI Forvisualizing and Analyzing of Large Spatial Datasets 155

S. R. Gorobtsov, A. V. Chernov. 3D-Modeling and Visualization of Urban Territories with Use of Modern Geodetic and Programming Means 165

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

E. I. Avrunev. About the Stability of Geospace and Technological Aspects of Its Control..... 180

T. N. Zhigulina, V. A. Meretsky, D. A. Vorobyov, A. O. Kiseleva. Patterns of the State Cadastral System Development..... 190

V. N. Klyushnichenko. Suspension and Refusals in Conduct of State Cadastre of Real Estate 203

ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

V. B. Zharnikov, Yu. S. Larionov. About Soil Fertility and Its Monitoring in Biofarming System 212

I. V. Mikheeva, A. A. Opleukhin. Identification of Probabilistic and Statistical Models of Properties of Ecological Systems and their Information Assessment 226

A. P. Mokhirev, M. M. Gerasimova, S. O. Medvedev. Finding Route of the Minimal Cost of the Transport Path when Delivering Wood From the Cutting Area..... 249

P. I. Mullayarova, O. N. Nikolaeva, L. K. Trubina. Geoecological Assessment and Mapping of Urban Road Verges 262

ANNIVERSARIES

To the 70th Anniversary of Valery Ivanovich Tatarenko, Professor, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honored Worker of Geodesy and Cartography..... 275

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 625.1/.5:[658.512.011.56+519.8+528.92:001.891.57]

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ

Ольга Газисовна Бесимбаева

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: bog250456@mail.ru

Елена Николаевна Хмырова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: hmyrova@mail.ru

Елена Алексеевна Олейникова

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, аспирант, ст. преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: panasenkoelena@mail.ru

Рустем Рашитович Ханнанов

Карагандинский государственный технический университет, 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, Бульвар Мира, 56, аспирант, преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии, тел. (7212)56-26-27, e-mail: khannanov_rustem@mail.ru

Рассмотрена современная технология автоматизированного проектирования железных дорог в Республике Казахстан. Компьютерная модель объекта транспортной инфраструктуры выполнена с учетом геометрических размеров и конструктивных особенностей реального объекта – участка железной дороги «Жезказган – Саксаульская». Целью данной работы является разработка метода многовариантного проектирования трассы железных дорог с использованием современных информационных систем и цифровых моделей местности (ЦММ). Системное использование средств автоматизации и вычислительной техники позволяет широко применять цифровое и математическое моделирование рельефа и инженерно-геологического строения местности, производить моделирование насыпи железной дороги в трехмерном пространстве, моделирование работы малых водопропускных труб и мостовых переходов и других сооружений. Использование компьютерных программ позволяет на стадии концептуального проектирования проработать несколько вариантов прохождения трассы с конкурентными технико-экономическими показателями, построенных с учетом множества факторов. В результате проведенного исследования был разработан, теоретически обоснован и программно реализован новый подход к организации процесса автоматизиро-

ванного трассирования железных дорог с оперативным анализом проектных решений по профилю в режиме реального времени.

Ключевые слова: ЦММ, цифровая модель рельефа, профиль, трасса, система автоматизированного проектирования, железная дорога, конструкция, трехмерное моделирование.

Введение

Проектирование железных дорог на разных стадиях различаются кругом решаемых экономических и проектных проблем; составом, объемом и точностью исходной изыскательской информации; степенью детализации проектных проработок и их оценки по основным показателям; шириной полосы варьирования и, наконец, конечной целью проектирования. Характерными особенностями проектирования железных дорог на разных стадиях являются постепенное сужение полосы поиска наилучшего положения трассы, возрастание точности исходной изыскательской информации (увеличение масштабов топографических планов, детализация ЦММ и т. д.) и возрастание детализации проектных проработок, категория проектируемой железной дороги. Целью настоящей работы является разработка метода многовариантного проектирования трассы железных дорог с использованием современных информационных систем и цифровых моделей местности (ЦММ) [1].

Система автоматизированного проектирования

В Республике Казахстан проводятся работы по строительству железнодорожных линий Жезказган-Бейнеу и Аркалык-Шубаркуль. Помимо этого, чтобы разгрузить железнодорожный узел Алматы от транзитных грузов, в 2015–2018 гг., по принципу государственно-частного партнерства, планируется построить участок линии в обход станции Алматы со станции Жетыген до станции Казыбек-Бек. В целом ожидается, что к 2020 г. состояние 81 % железнодорожных путей будет оцениваться как хорошее, 19 % – как удовлетворительное.

Увеличение пропускной способности железных дорог связано с повышением скорости движения пассажирских поездов до 210 км/ч и грузовых поездов – до 120 км/ч при увеличении осевых нагрузок до 30 тонн на ось. Эти поезда будут принимать на себя железнодорожный путь. ОАО «КТЖ» при реконструкции и строительстве новых железных дорог в Республике Казахстан использует современное программное обеспечение для оптимального решения задач проектирования железнодорожного строительства.

На проектные решения оказывают существенное влияние: дорожно-климатическая зона района изысканий и проектирования дороги, категория рельефа, инженерно-геологические, гидрогеологические, почвенно-грунтовые и другие условия района проектирования; вид, качество и объем исходной изыскательской информации для проектирования (материалы тахеометрических, фототеодолитных, аэрофотосъемок, наземно-космических съемок, материалы

инженерно-геологических и инженерно-гидрологических обследований, данные экономических изысканий и т. д.).

Материалы топографо-геодезических изысканий для подготовки предпроектной документации совместно с материалами других видов изысканий должны обеспечить выполнение анализа сравниваемых вариантов (конкурентных направлений) размещения дороги в полосе варьирования, а также представление рекомендаций по предварительному выбору оптимального варианта дороги в пределах притрассовой полосы.

Точность определения планово-высотного положения, плотность и условия закрепления пунктов (точек) геодезической основы должны удовлетворять требованиям производства крупномасштабных топографических съемок (обновления инженерно-топографических планов), в том числе для разработки проектной и рабочей документации предприятий, сооружений и жилищно-гражданских объектов (по ГОСТ 21.101–93 и ГОСТ 21.508–93), выноса проекта в натуру, выполнения специальных инженерно-геодезических работ и стационарных наблюдений за опасными природными и техноприродными процессами, а также обеспечения строительства, эксплуатации и ликвидации объектов [2].

В состав топографо-геодезических изысканий для подготовки предпроектной документации под размещение железных дорог входят:

- сбор, анализ и компьютерная обработка (оцифровка) существующих архивных фондовых картографических материалов (топографических карт и инженерно-топографических планов в цифровом и графическом видах в масштабах 1 : 100 000–1 : 2 000), в том числе аэро- и космоснимков, землеустроительных, лесоустроительных планов, материалов инженерных изысканий прошлых лет, данных по государственным (опорным) сетям;

- сбор и анализ дополнительных топографо-геодезических, аэрофотосъемочных материалов (в цифровом и графическом видах), а также материалов и данных изысканий прошлых лет по направлениям трасс;

- обследование пунктов опорной геодезической сети и в случае необходимости – ее восстановление (создание);

- создание инженерных ЦММ, создание (обновление) инженерно-топографических планов в масштабах 1 : 5 000–1 : 2 000 в зависимости от застроенности территории;

- камеральное трассирование вариантов прохождения трассы по инженерной цифровой модели полосы местности, созданной на основе инженерно-топографических планов в масштабах 1 : 5 000–1 : 2 000 (в зависимости от застроенности территории) и полевое обследование (рекогносцировка) намеченных вариантов.

Допустимые невязки измерений в геодезических ходах при изысканиях для строительства линейных сооружений принимаются согласно СП 11–104–97 [2].

Средние погрешности положения пунктов (точек) плановой съемочной геодезической сети, в том числе плановых опорных точек (контрольных пунктов), относительно пунктов опорной геодезической сети не должны превышать

0,1 мм в масштабе плана на открытой местности и на застроенной территории, а на местности, закрытой древесной и кустарниковой растительностью, – 0,15 мм.

Средние погрешности определения высот пунктов (точек) съемочной геодезической сети относительно ближайших реперов (марок) опорной высотной сети не должны превышать на равнинной местности 1/10 высоты сечения рельефа, а в горных и предгорных районах – 1/6 высоты сечения рельефа, принятой для инженерно-топографических планов [2].

Допустимые невязки измерений в геодезических ходах при изысканиях для строительства линейных сооружений принимаются согласно СП 11–104–97 [2] (таблица).

Допустимые невязки измерений в геодезических ходах при изысканиях для строительства линейных сооружений

№ п/п	Геодезические ходы при изысканиях для строительства линейных сооружений	Допустимые невязки измерений		
		угловых, минуты	линейных	высотных, мм
1	Ходы съемочной геодезической сети (магистральные ходы, ходы привязки к пунктам государственной или опорной геодезической сети, ходы планово-высотной привязки аэрофотоснимков) при изысканиях: – новых железных дорог; – новых автомобильных дорог	$0,3\sqrt{n}$	1/4 000	$30\sqrt{L}$
		$1\sqrt{n}$	1/2 000 (1/1 000*)	$50\sqrt{L}$
2	Ходы съемочной геодезической сети при изысканиях для реконструкции и расширения существующих дорог: – базисные и съемочные ходы на железнодорожных станциях, магистральные ходы на перегонах в населенных пунктах; – съемочные ходы на железнодорожных станциях, базисные ходы на разъездах, магистральные ходы на перегонах и автомобильных дорогах вне населенных пунктов	$0,3\sqrt{n}$	1/4 000	$30\sqrt{L}$
		$1\sqrt{n}$	1/2 000	$50\sqrt{L}$

В таблице \sqrt{n} – число углов в ходе; \sqrt{L} – длина хода, км; (*) – в трудных условиях пересеченной и горной местности.

При развитии съемочной геодезической сети полярным способом с применением электронных тахеометров длины полярных направлений допускается увеличивать до 1 000 м. Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтальных углов не должна превышать 15".

Развитие плано-высотной съемочной сети с использованием электронных тахеометров с регистрацией и накоплением результатов измерений (горизонтальных проложений, дирекционных углов, координат и высот пунктов и точек) допускается выполнять одновременно с производством топографической съемки.

Точность топографо-геодезических изысканий во многом определяет различия в технологии и методах автоматизированного проектирования и прежде всего, на начальных этапах проектного процесса при создании цифровых и математических моделей рельефа и геологического строения местности на полосе варьирования трассы, вид проектируемого объекта и его размеры (протяженность) [2].

Автоматизированное проектирование осуществляется с использованием систем прикладных программ всех элементов железной дороги (план трассы, варианты проектной линии продольного профиля, поперечные профили земляного полотна, варианты конструкции дорожных одежд, искусственные сооружения, подсчеты объемов строительных работ и т. д.) [3, 4].

Системное использование средств автоматизации и вычислительной техники позволяет широко использовать цифровое и математическое моделирование рельефа и инженерно-геологического строения местности, моделирование насыпи железной дороги в трехмерном пространстве, моделирование работы малых водопропускных труб и мостовых переходов и т. д.

Производится всесторонняя, глубокая оценка проектных решений по каждому из вариантов трассы и их соответствующая корректировка по многим критериям: объемы строительных работ, сметная стоимость, транспортно-эксплуатационные расходы, приведенные затраты, стоимость отчуждения земель, время сообщения, и т. д.; полная автоматизация подготовки, оформления и тиражирования проектно-сметной документации.

Система автоматизированного проектирования AutoCAD Civil 3D позволяет выполнять любые стадии проектов строительства, реконструкции и ремонта железных дорог всех категорий. Структурно процесс проектирования с помощью данной системы можно разбить на следующие основные этапы [5–8]:

- подготовка цифровой модели местности;
- определение трассы дороги в плане и профиле;
- трехмерное моделирование железной дороги;
- расчет объемов работ и создание выходной документации.

Эффективное применение AutoCAD Civil 3D для подавляющего большинства инфраструктурных проектов невозможно без подготовленной информации о местности в виде цифровой модели, включающей сведения о границах землепользования, геометрическом положении и характеристиках существующих

объектов инфраструктуры – автомобильных и железных дорогах, инженерных коммуникациях, зданиях и сооружениях и т. п., а также о природных объектах – заболоченных участках, реках и других водоемах, лесных массивах и, конечно же, рельефе.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) является базой, на которой строится вся динамическая модель проекта дороги [9]. ЦМР используется для создания продольных профилей линейных сооружений, является целевым объектом для определения проектных откосов и профилирования (рис. 1).

По готовой поверхности существующего рельефа легко определить черные отметки в любой требуемой точке, быстро и точно подсчитать объемы земляных работ.

В функциональных возможностях программного решения имеется набор средств и инструментов, позволяющих сформировать ЦМР по любым исходным данным.

Выбор трассы железной дороги предопределяет ее протяженность, размещение капитальных дорожных сооружений, стоимость выполнения строительных работ, характеристики движения. На стадии концептуального проектирования прорабатывается несколько вариантов прохождения трассы с конкурентными технико-экономическими показателями, построенных с учетом природных факторов: особенностей рельефа, водных препятствий, участков, неблагоприятных для строительства, а также факторов, обусловленных человеческой деятельностью.

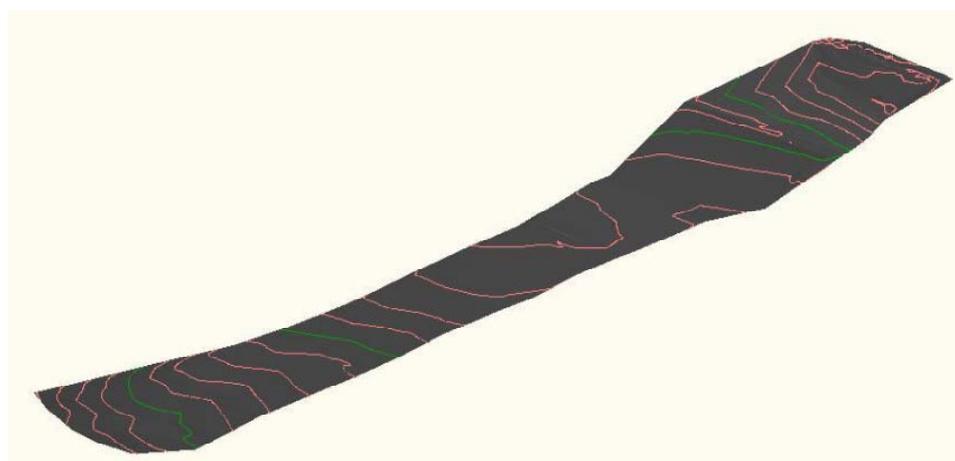


Рис. 1. Цифровая модель рельефа, созданная на основе двумерной топографической съемки

С применением САПР AutoCAD Civil 3D стало гораздо легче правильно оценить условия, в реальные сроки принять верные решения по трассе прохождения будущей железной дороги (рис. 2). Возможности динамической среды программного комплекса с взаимосвязанными элементами позволяют оперативно и качественно проработать множество вариантов.

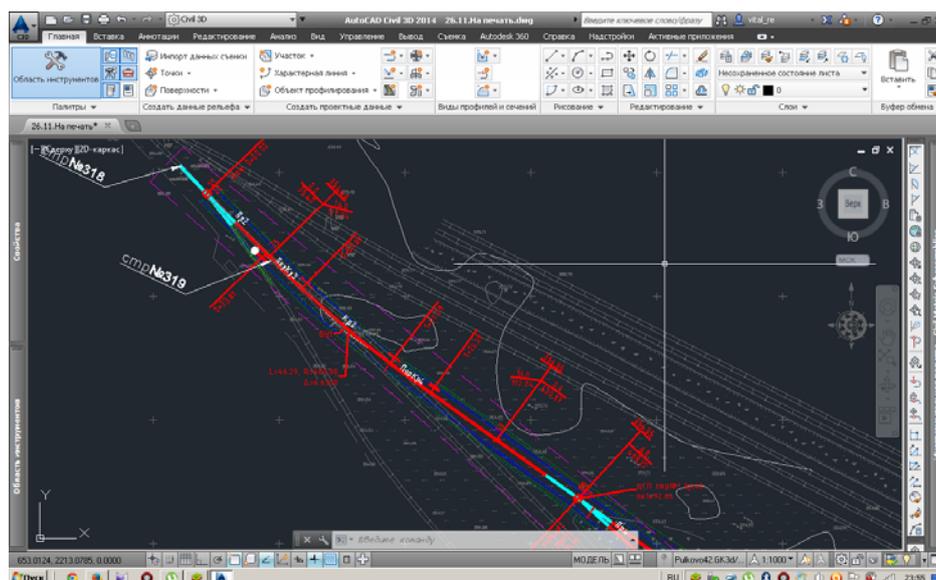


Рис. 2. Проектирование железнодорожных путей

После обоснования принятия трассы железной дороги выполняется комплекс изысканий. И уже по уточненным детализированным данным о местности по полосе топографической съемки с учетом выявленных геологических, гидрологических и метеорологических критериев формируется конечная осевая дороги.

С помощью широкого спектра инструментов трассирования в среде AutoCAD Civil 3D возможно выполнить определение трассы как традиционным и наиболее распространенным методом полигонального или тангенциального трассирования, так и более прогрессивным методом «гибкой линейки», или клотоидного трассирования [10–12]. Возможно преобразование в объекты Civil 3D-трассы обычных примитивов AutoCAD: отрезков, дуг или полилиний с автоматическим вписыванием в вершины углов кривых заданного радиуса.

Набольший интерес в арсенале средств AutoCAD Civil 3D представляют инструменты компоновки, содержащие превосходный набор команд и элементов, позволяющих легко и быстро создать трассу с корректной геометрией, да еще и с автоматической проверкой на соответствие нормативным критериям проектирования [13].

Оформление трасс управляется стилями объектов и наборами меток – динамических аннотаций, отображающих реальные характеристики объекта: пикетаж, геометрические точки, рубленые пикеты, проектные скорости и т. п. Кроме того, возможно создание меток по определенным пользовательским точкам, вершинам углов, элементам геометрии трассы.

Плановое положение трассы необходимо определять и с учетом рельефа местности. В AutoCAD Civil 3D за секунды можно создать профиль поверхности существующего рельефа, который будет динамически обновляться с изменением трассы (рис. 3). Продольный профиль состоит из самого разреза рельефа

фа – объекта «Профиль», сетки профиля – объекта «Вид профиля» и «Областей данных» – подпрофильной таблицы.



Рис. 3. Визуализация трехмерной модели спроектированного в AutoCAD Civil 3D-объекта

Настройки внешнего вида задаются стилями этих объектов и соответствуют требованиям нормативных документов, регламентирующих оформление [14].

Проектный профиль автомобильной дороги создается с помощью инструментов компоновки профиля. Как и при определении планового положения трассы, проектирование осуществляется с учетом нормативных критериев. С помощью файлов, входящих в поставку программы, можно выполнять контроль проектных решений на соответствие СНиП 32–01–95. При необходимости можно с легкостью формировать пользовательские файлы проверок, используя специальный редактор [15–17].

Инструменты компоновки продольного профиля позволяют создавать прямолинейные и дуговые элементы с различными типами связей по параметрам (длина, радиус, точка прохождения и т. д.), преобразованию из объектов AutoCAD (отрезок) или через табличный ввод данных. В инструментах содержатся средства управления точками вертикального пересечения, команды редактирования высотного положения участков профиля, увязки с другими трассами и др. [18, 19].

Трехмерное моделирование железной дороги начинается с определения типовых поперечных профилей (конструкций). Конструкции собираются из элементов, присоединяемых к базовой линии (линии трассы). В поставку программного комплекса включена обширная библиотека элементов конструкций, представляющих собой элементы земляного полотна (выход на рельеф, звенья по смещениям, уклонам и т. п.) [20, 21]. Имеются элементы для искусственных

сооружений, подпорных стенок, водоотвода. Элементы конструкций имеют входные параметры (ширина, толщина, поперечный уклон и т. д.) и целевые параметры (возможность определения планового и высотного положения из характеристик других объектов – трасс, профилей, характерных линий и объектов AutoCAD). Многие элементы обладают интеллектуальным поведением. Например, стандартный выход на рельеф можно настроить таким образом, чтобы в зависимости от возвышения проектного профиля над черным устанавливалась разная крутизна откоса, на крутых участках насыпи вставлялось ограждение, а в выемке задавался кювет с определенными параметрами [22].

Мастер кривых участков в Civil 3D 2014 позволяет формировать возвышение наружного рельса на железнодорожных трассах (рис. 4) [23]. Благодаря настраиваемым опциям можно выбрать метод поворота, критерии проектирования и другие параметры, необходимые для обеспечения соответствия проекта тем или иным стандартам.

В результате получается интеллектуальная трасса, которую можно использовать для построения 3D-моделей коридоров. Элементы конструкций содержат в себе наборы кодов. При моделировании дороги создается объект «Коридор». Конструкции с определенным шагом расставляются вдоль трассы в плане и продольного профиля по высоте. Точки конструкций с одноименными кодами объединяются и формируют линии (бровки и подошвы откосов и т. п.). Коды звеньев элементов конструкций задействуются для определения поверхностей по модели дороги – вертикальной планировки (верх дорожной одежды), земляного полотна и др. [16, 20].

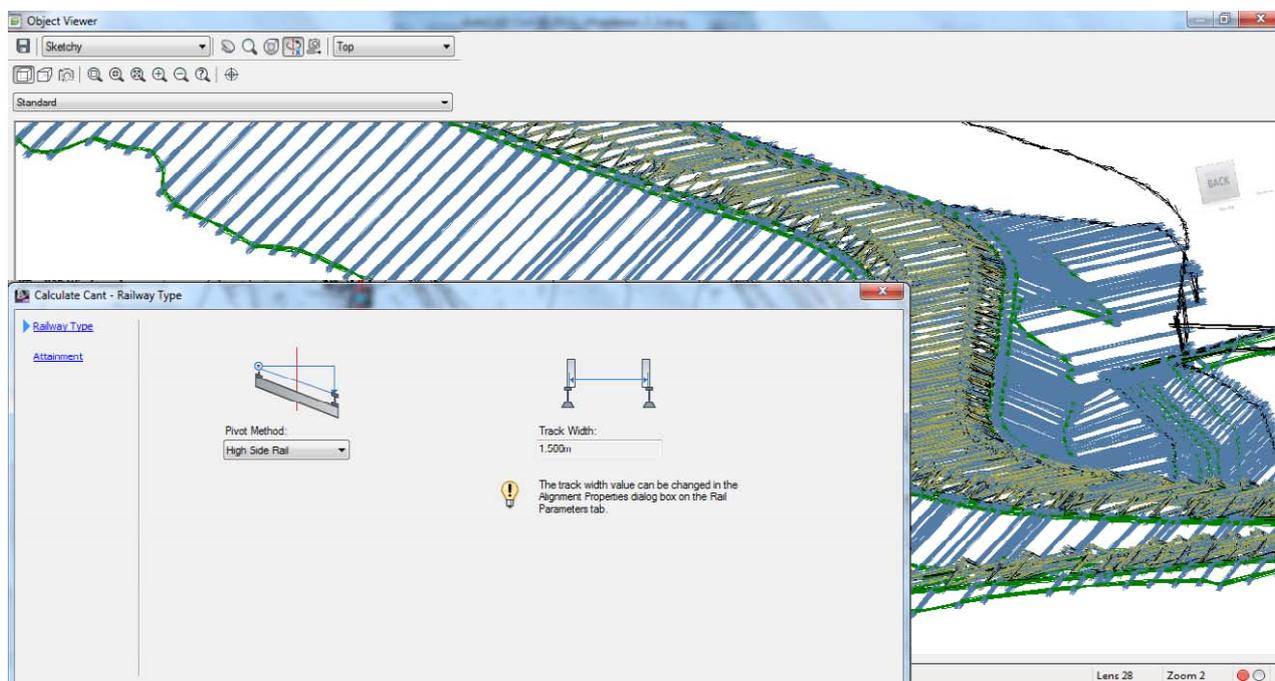


Рис. 4. Расчет возвышения наружного рельса

Коридоры могут состоять из нескольких базовых линий (совокупностей трасс и профилей) для моделирования сложных транспортных объектов – разъездов с разделенными полосами. Динамическая среда программного комплекса позволяет инженерам-проектировщикам работать с единой моделью железной дороги. При внесении изменений в любую составляющую проекта: трассу, продольный профиль, конструкцию – будут обновляться и общая модель коридора, и все построенные на основе коридора или взаимосвязанные с ним объекты. Для многих проектных организаций именно эта особенность AutoCAD Civil 3D стала ключевой при принятии решения о переходе на использование данной САПР [17]. Ведь не бывает проектов, не требующих исправлений и корректировок. Изменения неизбежны, а их учет в других программных средствах требует от инженеров массы времени и сил – порой проект приходится переделывать чуть ли не заново.

Динамическая среда AutoCAD Civil 3D позволяет автоматически обновлять не только модель проекта, но и выходные чертежи и результаты расчетов. Расчет объемов земляных работ осуществляется по осям сечений и поверхностям черной земли и коридора. Кодам форм элементов конструкций могут быть заданы материалы дорожной одежды. Затем инструментами подсчета объемов определены их объемы для строительства инфраструктурного проекта [19]. По осям сечений также оформляются необходимые для выпуска проекта поперечные профили в требуемом внешнем виде, разбитые на листы для вывода на печать. Механизм автоматизированного формирования выходных чертежей позволяет осуществить нарезку листов плана и продольного профиля трассы по шаблонам. В шаблонах листов имеются компоновки форматов, масштаба печати, рамочного оформления.

Заключение

В результате проведенного исследования был разработан, теоретически обоснован и программно реализован новый подход к организации процесса автоматизированного трассирования железных дорог с оперативным анализом проектных решений по профилю в режиме реального времени.

Материалы топографо-геодезических изысканий, выполненные согласно требованиям производства крупномасштабных топографических съемок, обеспечивают выполнение анализа сравниваемых вариантов (конкурентных направлений) размещения дороги в полосе варьирования.

Исследованные способы моделирования рельефа местности методом конечных элементов обеспечивают считывание информации о рельефе по заданному направлению с быстродействием, необходимым для реализации предлагаемой технологии процесса укладки трассы [20, 24].

Разработанный арсенал средств AutoCAD Civil 3D позволяет быстро создать трассу с корректной геометрией с автоматической проверкой на соответствие нормативным критериям проектирования [25].

Компьютерная модель объекта транспортной инфраструктуры «железнодорожная насыпь» выполнена с учетом геометрических размеров и конструктивных особенностей реального объекта – участка железнодорожной дороги «Жезказган – Саксаульская» Перегон раз. 2 – филиала ОАО «КТЖ».

Предлагаемая методика организации процесса автоматизированного трассирования с практической точки зрения ориентирована на снижение трудоемкости вариантных проработок проектных решений по трассе железнодорожной линии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрианов О. А. Применение программы «Путь» в проектировании реконструкции и текущем содержании железнодорожного пути // Автоматизированные технологии CREDO. – 2000. – Вып. 2. – С. 40–44.
2. СП 11–104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. ГОСТ 23501.0–79. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. ГОСТ 23501.1–79. Системы автоматизированного проектирования. Стадии создания [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. ГОСТ 23501.2–79. Системы автоматизированного проектирования. Разработка, согласование и утверждение технического задания [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. ГОСТ 23501.2–79. Система автоматизированного проектирования (САПР) железных дорог [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
7. Бучкин В. А., Лисицын И. М. Трассирование железнодорожной линии в интерактивном режиме // Транспортное строительство. – 2006. – Вып. 12. – С. 22–24.
8. Геоинформатика транспорта / Б. А. Левин, В. М. Круглов, С. И. Матвеев, В. Я. Цветков, В. А. Коугия. – М. : Российская академия наук ВИНТИ, 2006. – 335 с.
9. Матвеев С. И., Коугия В. А. Высокоточные цифровые модели пути и спутниковая навигация железнодорожного транспорта : монография. – М. : Маршрут, 2005. – 290 с.
10. Матвеев С. И., Коугия В. А., Цветков В. Я. Геоинформационные системы и технологии на железнодорожном транспорте. – М. : УМК МПС России, 2002. – 288 с.
11. Кулажский А. В., Портнов А. В. Моделирование рельефа при интерактивном трассировании линейных сооружений // Транспортное строительство. – 2010. – Вып. 5. – С. 20–21.
12. Kulazhsky, A. Neural Networks Application in Modeling the Relief of a Land // First International Scientific-Applied Conference «Problems and Prospects of Survey, Design, Construction and Exploiting of Northeast Asia Railways» : Students and Post-graduate Students' Works (Irkutsk, May 15, 2009). – Irkutsk : Irkutsk State Transport University, 2009. – P. 42–49.
13. Пожидаев С. А. Автоматизация расчетов земляных масс в проектах вертикальной планировки транспортных коммуникаций // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2002. – № 1 (4). – С. 66–69.
14. Бучкин В. А., Лисицын И. М. Проблемы визуализации процесса автоматизированного проектирования трассы железных дорог // Повышение эффективности работы путевого хозяйства и инженерных сооружений железных дорог : сборник научных трудов. – 2006. – Вып. 45 (128). – С. 203–204.
15. Лисицын И. М. Проблемы визуального моделирования при автоматизированном проектировании линейно-протяженных объектов // Проблемы развития сети железных дорог : межвуз. сборник научных трудов под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : ДВГУПС, 2006. – С. 97–101.

16. Ботуз С. П., Лисицын И. М. Мониторинг интерактивных систем программного управления и регулирования // Научная сессия МИФИ 2005 «Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы»: сборник научных трудов в 15 т. – М. : МИФИ, 2005. Т. 1. – С. 238–239.
17. Прикладная геоинформатика / А. Д. Иванников, В. П. Кулагин, А. Н. Тихонов, В. Я. Цветков. – М. : МАКС Пресс, 2005. – 177 с.
18. Шварцфельд В. С. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог на основе геоинформационных технологий : дис. ... д-ра. техн. наук. – Хабаровск : ДВГУПС, 2001. – 400 с.
19. Никитин А. Я. Геодезический контроль строительства опор мостов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Вып. 1 (22). – С. 70–80.
20. Кашанин Н. В., Сухарев И. И. Исследование точности интерполирования отметок продольного профиля железной дороги различными методами // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Вып. 2 (22). – С. 36–43.
21. Особенности наземного лазерного сканирования для мониторинга железнодорожных тоннелей / А. В. Середович, А. В. Иванов, Т. А. Широкова, А. В. Антипов, А. В. Комиссаров // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 28–34.
22. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Леонов Н. Н. Оценка устойчивости железнодорожной насыпи // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 87–93.
23. Nazarov L. A., Nazarova L. A., Kozlova M. P. Earthquake parameters forecast by geodetic observations // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 25–44.
24. Ершова А. А. Геодезические надстройки для AutoCAD. Проблема выбора. Сравнительный анализ // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 43–48.
25. Хмырова Е. Н., Олейникова Е. А., Литвинова М. И. Инновационные решения геодезического обеспечения при строительстве автодороги // Инновации в технологиях и образовании : сборник статей участников IX Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 286–289.

Получено 26.10.2018

© О. Г. Бесимбаева, Е. Н. Хмырова,
Е. А. Олейникова, Р. Р. Ханнанов, 2018

TECHNOLOGY OF AUTOMATED DESIGNING OF RAILWAYS WITH THE USE OF DIGITAL AND MATHEMATICAL MODELS OF LOCALITY

Olga G. Besimbaeva

Karaganda State Technical University, 56, Mira avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan Republic, Ph. D., Associate Professor, Department of Mine Survey and Geodesy, phone: (7212)56-26-27, e-mail: bog250456@mail.ru

Elena N. Khmyrova

Karaganda State Technical University, 56, Mira avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan Republic, Ph. D., Associate Professor, Department of Mine Survey and Geodesy, phone: (7212)56-26-27, e-mail: hmyrovae@mail.ru

Elena A. Oleynikova

Karaganda State Technical University, 56, Mira avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan Republic, Ph. D. Student, Senior Lecturer, Department of Mine Survey and Geodesy, phone: (7212)56-26-27, e-mail: panasenkoelena@mail.ru

Rustem R. Hannanov

Karaganda State Technical University, 56, Mira avenue, Karaganda, 100027, Kazakhstan Republic, Ph. D. Student, Lecturer, Department of Mine Survey and Geodesy, phone: (7212)56-26-27, e-mail: khannanov_rustem@mail.ru

The paper considers the modern technology of computer-aided design of railways in Kazakhstan. The computer model of the transport infrastructure object is made taking into account the geometrical dimensions and design features of the real object – the section of the railway "Zhezkazgan – Saksaulskaya". The aim of this work is to develop a method of multivariant design of railway tracks using modern information systems and digital terrain models (DTM). The system use of automation and computer technology allows to use extensively digital and mathematical modeling of the terrain and geotechnical structure of the terrain, to simulate the embankment of the railway in three-dimensional space, modeling the operation of small culverts and bridge crossings and other structures. The use of computer programs allows at the stage of conceptual design to study several variants of the route with competitive technical and economic indicators, built taking into account a variety of factors. As a result of the study, there was developed a new approach to the organization of the process of automated tracing of railways with operational analysis of design solutions for the profile in real time. It was theoretically justified and programmatically implemented.

Key words: DTM, digital elevation model, profile, route, computer-aided design system, railway, construction, three-dimensional modeling.

REFERENCES

1. Andrianov, O. A. (2000). Application of the program "Way" in the design of reconstruction and the current content of the railway. *Avtomatizirovannye tekhnologii CREDO [Journal of Automated CREDO Technologies]*, 2, 40–44 [in Russian].
2. SP 11-104-97. Engineering geodesical survey for construction. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. GOST 23501.0-79. CAD system. Fundamentals. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
4. GOST 23501.1-79. CAD system. Stages of creation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
5. GOST 23501.2-79. CAD system. Development, coordination and approval of technical specifications. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
6. GOST 23501.2-79. Railway computer-aided design (CAD) system. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
7. Buchkin, V. A., & Lisitsyn, I. M. (2006). Interactive railway laying-out. *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*, 12, 22–24 [in Russian].
8. Levin, B. A., Kruglov, V. M., Matveev, S. I., Tsvetkov, V. Ya., & Kougiya, V. A. (2006). *Geoinformatika transporta [Geoinformatics of transport]*. Moscow: Russian Academy of Sciences VINITI, 335 p. [in Russian].
9. Matveev, S. I., & Kougiya, V. A. (2005). *Vysokotochnye cifrovye modeli puti i sputnikovaya navigaciya zhelezнодорожного транспорта [Highly accurate digital model of the track and satellite navigation for railway transport]*. Moscow: Marshrut Publ., 290 p. [in Russian].
10. Matveev, S. I., Tsvetkov, V. Ya., & Kougiya, V. A. (2002). *Geoinformacionnye sistemy i tekhnologii na zhelezнодорожном транспорте [Geographic information systems and technologies in railway transport]*. Moscow: Russian Ministry of internal Affairs, 288 p. [in Russian].
11. Kulazhskiy, A. V., & Portnov, A. V. (2010). Terrain modeling in interactive tracing of line structures. *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*, 5, 20–21 [in Russian].

12. Kulazhsky, A. V. (2009). Neural Networks Application in Modeling the Relief of a Land. *Proceedings of First International Scientific-Applied Conference: Problems and Prospects of Survey, Design, Construction and Exploiting of Northeast Asia Railways: Students and Post-graduate Students' Works* (pp. 42–49). Irkutsk: Irkutsk State Transport University (IrGUPS) Publ.
13. Pozhidaev, S. A. (2002). Automation of calculations of earth masses in projects of vertical planning of transport communications. *Vestnik BelGUTa: nauka i transport [Bulletin of BelGUT: Science and Transport]*, 1(4), 66–69 [in Russian].
14. Buchkin, V. A., & Lisitsyn, I. M. (2006). Problems of visualization of railway track computer-aided design process. In *Sbornik nauchnyh trudov: Povyshenie ehffektivnosti raboty putevogo hozyajstva i inzhenernyh sooruzhenij zheleznyh dorog: Vyp. 45(128) [Collection of Scientific Papers: Improving the Efficiency of Track Facilities and Engineering Structures of Railways: Issue 45(128)]* (pp. 203–204). Yekaterinburg: URGUPS Publ. [in Russian].
15. Lisitsyn, I. M. (2006). Problems of visual modeling in automated design of linearly extended objects. Problems of railway network development. *Mezhvuz. collection of scientific works ed B. C. Sarsfield*. Khabarovsk: DVGUPS Publ. 97-101. [in Russian].
16. Botuz S.P., Lisitsyn I.M. (2005). Monitoring of interactive software control and regulation systems. In *Sbornik nauchnyh trudov Nauchnoy sessii MIFI 2005: Avtomatika. Mikroehlektronika. Ehlektronika. Ehlektronnye izmeritel'nye sistemy. Komp'yuternye medicinskie sistemy: T. 1 [Proceedings of Scientific session MEPhI 2005: Avtomatika. Microelectronics. Electronics. Electronic Measuring System. Computer Medical Systems: Vol. 1]* (pp. 238–239). Moscow: MEPhI Publ. [in Russian].
17. Ivannikov, A. D., Kulagin, V. P., Tikhonov, A. N., & Tsvetkov, V. Ya. (2005). *Prikladnaya geoinformatika [Applied Geoinformatics]*. Moscow: MAKS Press, 177 p. [in Russian].
18. Shvartsfel'd, B. C. (2001). Theory and practice of designing of regional railway network development on the basis of geoinformation technologies. *Doctor's thesis*. Khabarovsk: FESTU, 400 p. [in Russian].
19. Nikitin, A. Ya. (2017). Geodetic control of construction of the bridges. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 70–80 [in Russian].
20. Kashanin, N. V., & Sukharev, I. I. (2017). A study of the accuracy of interpolation of the elevations of the longitudinal profile of the railway by different methods. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 36–43 [in Russian].
21. Seredovich, A. V., Ivanov, A. V., Shirokova, T. A., Antipov, A. V., & Komissarov, A. V. (2010). Features of ground laser scanning for monitoring railway tunnels. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 1(12), 28–34 [in Russian].
22. Besimbaeva, O. G., Khmyrova, E. N., Leonov, N. N. (2016). Assessment of railway embankment stability. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 87–93 [in Russian].
23. Nazarov, L. A., Nazarova, L. A., Kozlova, M. P. (2011). Earthquake parameters forecast by geodetic observations. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 3(16), 25–44 [in Russian].
24. Ershova, A. A. (2012). Geodesic add-ins for AutoCAD. Problem of choice. Comparative analysis. *Vestnik SGGA [Vestnik SSGA]*, 2(18), 43–48 [in Russian].
25. Khmyrova, E. N., Oleynikova, E. A., & Litvinova, M. I. (2016). Innovative solutions of the geodetic support for the construction of the road. In *Sbornik materialov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Innovacii v tekhnologiyah i obrazovanii [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference: Innovation in Technologies and Education a Collection of Articles by Participants]* (pp. 286–289) [in Russian].

Received 26.10.2018

© O. G. Besimbaeva, E. N. Khmyrova, E. A. Oleynikova, R. R. Khannanov, 2018

УДК 902.692:528

УТОЧНЕНИЕ ДАТИРОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСТРОАРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ ПО АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Елена Геннадьевна Гиенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии, e-mail: elenagienko@yandex.ru

В статье рассмотрены дифференциальные формулы геодезической астрономии, применение которых в астроархеологии позволяет практически исключить систематические погрешности определения азимута начального направления и погрешности, вызванные атмосферной рефракцией. Показано, что с использованием этих формул можно оценить погрешность астрономического датирования, уточнить место наблюдателя и/или условия наблюдения, выполнить редуцированные вычисления при невозможности установить геодезический инструмент в точку наблюдения, уточнить астрономическое датирование археологического памятника при известных обстоятельствах наблюдения в современное время, смоделировать для древней эпохи светотеневую картину в астрономически значимые дни года. На примере двух астроархеологических памятников (в Горном Алтае и в Хакасии) продемонстрированы возможности применения этих формул в комплексе с данными геодезических измерений, натурными наблюдениями, цифровой фотографией и астрономическими программами-планетариями. Отмечено, что такой комплексный подход позволяет существенно повысить точность астрономического датирования археологических памятников, а также уточнить детали их функционирования.

Ключевые слова: астроархеология, геодезическая астрономия, датирование археологических памятников, метод датирования Локьера, летнее солнцестояние.

Введение

В настоящее время перспективным направлением в археологии является использование естественно-научных методов – главным образом, биологических и геофизических, основанных на изучении материальных объектов [1]. Астрономические методы, относящиеся к естественнонаучным, пока не находят широкого применения в археологии. Тем не менее, основанные на астрономо-геодезических измерениях методы используются для решения следующих задач в археологии:

- определение связанной с астрономическими направлениями пространственной организации археологических памятников [2–7];
- рассмотрение назначения и особенностей функционирования древних культовых комплексов [2, 7, 8];
- изучение календарных систем и археоастрономических знаний [2, 9];
- астрономическое датирование археологических памятников [10].

В настоящее время значительно упростить и одновременно расширить применение астрономических методов в археологии (в частности, для уточнения датирования и деталей функционирования археологических памятников) позволяет комплексное использование:

- электронных геодезических инструментов для измерений (исключение некоторых инструментальных погрешностей, автоматизация измерений);
- астрономических программ-планетариев (упрощение астрономических расчетов);
- ГНСС-навигаторов (получение географических координат и точного времени);
- цифровых фотоаппаратов с метками времени (фотограмметрия, моделирование светотеневой картины на памятниках, редуцированные вычисления и др.).

Датирование археологических памятников, как правило, осуществляется на основе соотнесения материальных находок к той или иной культуре. Астрономические методы здесь либо не применяются вовсе, либо являются вторичными по отношению к данным археологических раскопок. Это объясняется тем, что астрономическое датирование выполняется в большинстве своем по наблюдениям Солнца и сопровождается большими погрешностями. Однако применение дифференциальных формул сферической астрономии в комплексе с натурными наблюдениями в астрономически значимые дни года позволяет существенно уменьшить систематические ошибки измерений и, следовательно, уточнить результаты астрономического датирования по Солнцу.

В работе предлагается применение дифференциальных формул для уточнения деталей функционирования археологических памятников и датирования по Солнцу; приведены примеры комплексного использования астрономо-геодезических измерений, астрономических программ-планетариев, ГНСС-навигаторов и цифровой фотографии для решения перечисленных задач.

Теория и методы

В основе астрономических расчетов при астроархеологических исследованиях лежит формула сферической астрономии, связывающая склонение светила δ с географической широтой места наблюдения ϕ и горизонтальными координатами (азимутом A и высотой h измеряемого направления) [11, 12]:

$$\sin \delta = \sin h \cdot \sin \phi + \cos h \cdot \cos \phi \cdot \cos A. \quad (1)$$

В формуле (1) азимут A отсчитывается от северного направления.

В измеренную высоту вводятся поправки за рефракцию и суточный параллакс Луны или Солнца, а также за видимый угловой радиус Солнца или Луны, если для расчетов необходим верхний или нижний край светила.

Склонение Солнца в течение года меняется от зимнего солнцестояния к летнему в пределах

$$-\varepsilon_t \leq \delta_{\odot} \leq \varepsilon_t,$$

где ε_t – наклон эклиптики к экватору в эпоху наблюдения t .

Наклон эклиптики экватору ε_t претерпевает долгопериодические колебания вследствие прецессии от планет [11], и на этом явлении основан метод астрономического датирования археологических памятников, предложенный английским астрономом Д. Н. Локьером [13]. Если на археологическом памятнике есть обозначенное направление на восход или заход Солнца в солнцестояние, то значение полученного по формуле (1) склонения Солнца будет равно наклону эклиптики на эпоху наблюдения ε_t , и, соответственно, можно будет выполнить датирование данного памятника.

Значения наклона эклиптики к экватору на разные эпохи, приведены в табл. 1 (по данным [14]). Как видно из таблицы, величина ε_t меняется очень медленно и в небольших пределах, что делает метод датирования Локьера весьма чувствительным к погрешностям входных данных.

Таблица 1

Значения наклона эклиптики к экватору
с 2500 по 1000 г. до н. э. и погрешность датирования

Эпоха, г. до н. э.	ε_t	Погрешность датирования при изменении ε на 1', годы
1000	23°49,1'	±152
1500	23°52,4'	±152
2000	23°55,7'	±161
2500	23°58,8'	

Как видно из табл. 1, метод Локьера обеспечивает погрешность датирования в рассматриваемый интервал времени в среднем ±150 лет при погрешности склонения Солнца в солнцестояние, равной 1'.

В статье [15] отмечается высокая точность геодезических построений в древности, а в [16] обосновывается необходимая точность геодезических измерений при астроархеологических исследованиях, соответствующая разрешающей способности невооруженного зоркого человеческого глаза – одной угловой минуте, что вполне достижимо современной измерительной аппаратурой.

Основным источником погрешностей датирования по методу Локьера является неточное знание положения наблюдателя и обстоятельств наблюдения. Малое изменение положения наблюдателя ΔS при расстоянии до точки наблюдения D приводит к погрешностям в направлении $\Delta \beta''$

$$\Delta\beta'' = \Delta S\rho'' / D ,$$

где $\rho'' = 206\,265''$ – количество секунд в радиане.

Рассмотрим, на какую величину изменяется склонение при изменении азимута или высоты измеряемого направления. Для этого продифференцируем формулу (1) по азимуту и высоте

$$\begin{aligned} \partial\delta / \partial A &= -\cos h \cdot \cos \varphi \cdot \sin A / \cos \delta; \\ \partial\delta / \partial h &= (\cos h \cdot \sin \varphi - \sin h \cdot \cos \varphi \cdot \cos A) / \cos \delta. \end{aligned} \quad (2)$$

Заменим в формуле (2) дифференциалы малыми разностями и получим изменение склонения $\Delta\delta$, вызванное изменениями азимута ΔA и высоты Δh

$$\Delta\delta = [-\Delta A \cdot \cos h \cdot \cos \varphi \cdot \sin A + \Delta h \cdot (\cos h \cdot \sin \varphi - \sin h \cdot \cos \varphi \cdot \cos A)] / \cos \delta. \quad (3)$$

Полученные формулы (2), (3) позволяют:

- оценить погрешность вычисления склонения Солнца и, следовательно, астрономического датирования, в зависимости от направления наблюдения и погрешностей измерения горизонтальных координат;

- уточнить место наблюдателя и/или условия наблюдения, если известна эпоха функционирования археологического памятника по другим данным;

- выполнить редуцированные вычисления при невозможности установить теодолит в точку наблюдения;

- определить изменение склонения по измеренным разностям горизонтальных координат при непосредственных наблюдениях восходов и заходов Солнца в дни солнцестояний в современную эпоху и тем самым уточнить астрономическое датирование при известных обстоятельствах наблюдения;

- смоделировать для древней эпохи светотеневую картину в астрономически значимые дни года [17, 18].

Горизонтальные координаты (A , h) Солнца при натуральных наблюдениях можно определить по его часовому углу [19, 20] или в астрономической программе-планетарии, если с помощью ГНСС-навигатора измерены географические координаты и время наблюдения. Также можно использовать фотографии событий захода или восхода светил с меткой времени для восстановления необходимых координат, определения азимутов и моделирования освещенности памятника.

Достоинство дифференциальных формул (2), (3) состоит в том, что в разностях горизонтальных координат ΔA , Δh исключаются такие значимые погрешности, как погрешность в астрономическом азимуте начального направления [20, 21] и погрешность учета атмосферной рефракции при вычислении высоты светила. Кроме того, для вычисления малых изменений склонения требуется меньшее число значащих цифр во всех компонентах тригонометрических формул. При склонении 90° (на полюсах) формулы имеют особенности, а для

близполюсных звезд – большую чувствительность к изменениям горизонтальных координат, однако на расчет склонений Солнца или Луны эти факторы не оказывают влияния.

Примеры использования дифференциальных формул

Приведем примеры использования дифференциальных формул при исследовании астроархеологических памятников.

1. Тархатинский мегалитический комплекс, Республика Алтай, Кош-Агачский район. Этот многофункциональный астроархеологический памятник изучался в разные годы рядом исследователей [22, 23]; эпоха его создания и функционирования оценивается серединой II тысячелетия до н. э. Одним из ключевых объектов на Тархатинском мегалитическом комплексе является «Колыбель Сартакпая» – по мнению исследователей, место расположения древнего наблюдателя в день летнего солнцестояния. В течение всего года «Колыбель Сартакпая» при заходе Солнца находится в тени от близкорасположенного мегалита, и только во время летнего солнцестояния его освещают последние лучи заходящего Солнца. Особенностью данного объекта является вертикальная стена ближайшего мегалита, ограничивающая обзор по азимуту с места наблюдения захода Солнца в летнее солнцестояние. В этом случае рост наблюдателя становится не важен.

В летнее солнцестояние в 2010 г. была сделана фотография, где свет заходящего Солнца освещает лишь западный край этого мегалита (рис. 1). В древнее время склонение летнего Солнца было больше по сравнению с современностью (см. табл. 1), и заход Солнца происходил севернее, следовательно, освещалась большая часть мегалита «Колыбель Сартакпая». Для моделирования освещения середины данного мегалита (возможного положения наблюдателя) были применены указанные формулы, подробности см. в [24, 25]. Склонение заходящего Солнца (верхний край) оказалось равным $24^{\circ}0,4'$, что соответствует эпохе 2750 г. до н. э. ± 1000 лет. Использование дифференциальных формул (3) принципиально позволило выполнить астрономическое датирование памятника без непосредственных вычислений по формуле (1), поскольку прямые измерения горизонтальных координат (A , h) теодолитом с точки наблюдения были невозможны. Большая погрешность датирования ± 1000 лет обусловлена, главным образом, погрешностями измеряемого горизонтального угла на малых расстояниях и неопределенностью положения наблюдателя.

Подобным образом, на основании натуральных наблюдений и с привлечением дифференциальных формул можно реконструировать освещенность Солнцем деталей археологических памятников, петроглифических композиций и светотеневую картину в древнее время [17, 18], что позволит историкам и археологам дать некоторое понимание мировоззрения и религиозных представлений древних людей.



Рис. 1. Заход Солнца в летнее солнцестояние на Тархатинском мегалитическом комплексе. Видна освещенная правая (северная) часть мегалита «Колыбель Сартакпая». Середина мегалита остается в тени

2. Святилище Пятого Сундука. Находится в Ширинском районе Хакасии на левом берегу реки Белый Июс, в местности «Сундуки». Здесь с севера на юг расположена гряда вершин, пологих с западной стороны, с крутыми скальными обрывами с восточной. Местные жители называют эту гряду и местность «Сундуками» по имени самой примечательной вершины с названием Сундук, перечисляя «Сундуки» с севера на юг с первого по восьмой. На восточном склоне Пятого сундука расположено святилище, представляющее собой неглубокий выдолбленный в скале грот, обращенный на северо-восток. На внутренней фасадной стене грота нанесены две линии петроглифов, изображающие рассеченных на части змею и дракона. По исполнению, стилю и семантике петроглифы относятся к Окуневской культуре (первая половина II тысячелетия до н. э.). В левом верхнем углу грота находится подтреугольная выемка (сделанная, скорее всего, намеренно), а выше и левее грота, на скальном гребне – скульптурное изображение орла с распахнутым клювом, образующим характерную щель. Описание памятника приведено в [10, 26].

Напротив грота, в 100 м от него, обнаружена треугольная древняя выкладка размером около 0,5 м из плит, глубоко погруженных в грунт. Предположение, что это могла быть древняя наблюдательная площадка, основано на сочетании двух следующих фактов: 1) по результатам геодезических наблюдений и астрономических расчетов в древнюю эпоху с этой площадки наблюдался заход летнего Солнца (последний его луч исчезал в «клюве орла» левее и выше грота); 2) с данной площадки зафиксировано точное отмеченное направление меридиана [10].

Для выполнения расчетов необходимы широта места наблюдения ($\phi = 54^{\circ}38,17'$), а также горизонтальные координаты точки захода Солнца в «клюве Орла», измеренные с наблюдательной площадки: высота над горизонтом, с учетом рефракции ($h = 16^{\circ}36,01'$), азимут направления (от точки севера), определенный по наблюдениям Солнца ($A = 288^{\circ}30,00'$), при высоте инструмента 1,46 м. Расстояние от площадки до «Клюва Орла» (горизонтальное проложение) – 99,7 м.

Основные результаты исследований опубликованы в [10], где выполнено датирование памятника с оценкой погрешности, связанной, главным образом, с неточным знанием положения наблюдателя.

В настоящей статье покажем применение дифференциальных формул для уточнения датирования данного памятника по результатам натуральных наблюдений и фотографий захода Солнца в день летнего солнцестояния в 2006 г. Последний луч Солнца попал в щель, образуемую «клювом Орла» (рис. 2), при наблюдении на расстоянии 1,25 м к северу от центра древней наблюдательной площадки при высоте фотоаппарата 1,60 м. Наклон эклиптики к экватору в 2006 г. (и, следовательно, склонение Солнца в летнее солнцестояние) $\varepsilon_{2006} = \delta_{2006} = 23^{\circ}26,46'$ [27].

Рассчитаем, на какие величины изменятся азимут и вертикальный угол при перемещении наблюдателя от центра древней площадки на современное место фотографирования (на 1,25 м). Разность высоты теодолита и положения фотоаппарата по вертикали – 0,14 м. При расстоянии до точки наблюдения («Клюва орла») 99,7 м такие смещения соответствуют изменению азимута на $\Delta A = 43,10'$, изменению вертикального угла на $\Delta h = 4,83'$; азимут и вертикальный угол направления на «клюв Орла» с точки фотографирования, таким образом, будут получены, как $A^* = A - \Delta A$; $h^* = h - \Delta h$.

Результаты расчетов склонений δ по прямой и дифференциальной формулам (1) и (3) приведены в табл. 2. Склонение $\delta_{\text{привед.}}$ с использованием дифференциальных формул вычислялось для точного значения склонения на 2006 г. из астрономического ежегодника: $\delta_{\text{привед.}} = \delta_{2006} + \Delta\delta$. Вычисления $\Delta\delta$ по дифференциальной формуле (3) были выполнены для двух высот инструмента – 1,46 и 1,60 м.

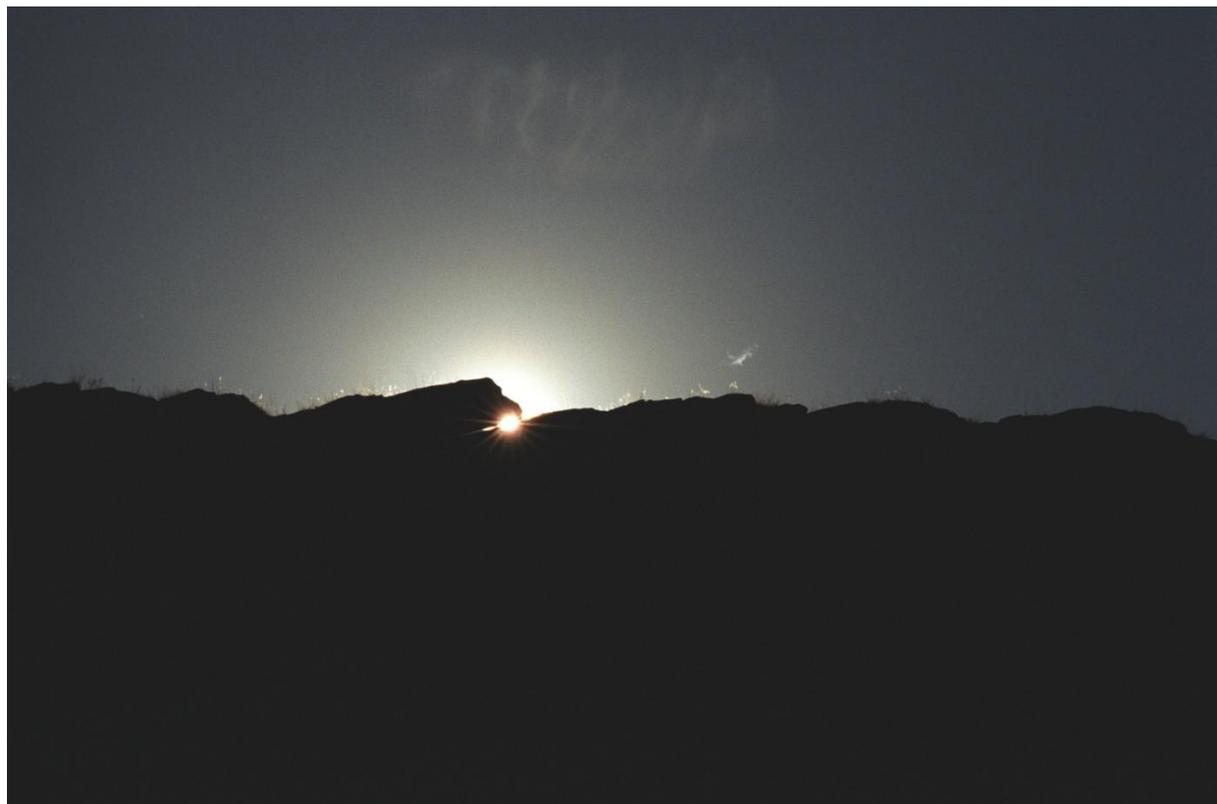


Рис. 2. Заход Солнца в летнее солнцестояние, наблюдаемый в «Клюве орла» от подножия Пятого сундука

Таблица 2

Результаты вычислений склонений по прямым и дифференциальным формулам. Широта точки наблюдения $\phi = 54,60^\circ$. Верхний край диска Солнца

Прямая формула (1)				Дифференциальная формула (3)			
Наблюдательная площадка, $i = 1,46$ м		Точка фотографирования 2006 г, $i = 1,60$ м		Наблюдательная площадка, $i = 1,60$ м		Наблюдательная площадка, $i = 1,46$ м	
1	2	3	4	5	6	7	8
A	$288^\circ 30,00'$	A^*	$287^\circ 46,90'$	ΔA	$43,10'$	ΔA	$43,10'$
h	$16^\circ 36,01'$	h^*	$16^\circ 31,17'$	Δh	0	Δh	$4,83'$
				$\Delta \delta$	$24,88'$	$\Delta \delta$	$28,72'$
$\delta_{\text{изм.}}$	$23^\circ 55,82'$	δ	$23^\circ 27,10'$	$\delta_{\text{привед.}} = 23^\circ 51,34'$		$\delta_{\text{привед.}} = 23^\circ 55,18'$	
		δ_{2006}	$23^\circ 26,46'$				
		$\Delta \delta_{2006}$	$0,64'$	$\delta_{\text{изм.}} - \delta_{\text{привед.}}$	$3,45'$	$\delta_{\text{изм.}} - \delta_{\text{привед.}}$	$0,64'$
2020 до н. э.		2006 н. э.		1339 до н. э.		1915 до н. э.	

Как видно из табл. 2, склонение Солнца, вычисленное с точки фотографирования в 2006 г. (столбец 4), отличается от табличного значения на $0,64'$, что не превышает методическую погрешность определения азимута начального на-

правления по Солнцу ($1'$) и свидетельствует об отсутствии грубых ошибок при переносе наблюдений с древней наблюдательной площадки в точку фотографирования. На такую же величину в пределах округления ($0,64'$) отличаются расчеты с использованием дифференциальных формул для высоты $i = 1,46$ м, что показывает возможность замены прямых формул дифференциальными в данном случае.

Расчеты по дифференциальным формулам с привлечением данных натуральных наблюдений в летнее солнцестояние позволили уточнить значение склонения летнего Солнца и, следовательно, датирование памятника. Дата, определенная для варианта наблюдателя с высотой уровня глаз 1,6 м (1339 г. до н. э.), соответствует как археологическому датированию памятника (Окуневская культура, первая половина II тысячелетия до н. э.), так и антропологическим данным (росту человека Окуневской культуры). Таким образом, можно датировать памятник по методу Локьера с применением дифференциальных формул и натуральных наблюдений эпохой 1300 г. до н. э. ± 500 лет.

Следует отметить, что приведенный пример показывает, как неустойчив метод прямого датирования по Солнцу к ошибкам положения наблюдателя при коротких расстояниях. Изменение по высоте всего на 14 см привело к разнице датирования в 576 лет.

Заключение

Астрономическое датирование археологических памятников по методу Локьера сопровождается большими погрешностями, обусловленными чувствительностью метода к ошибкам входных данных. Применение дифференциальных формул сферической астрономии в комплексе с результатами ГНСС-измерений, натурными наблюдениями, цифровой фотографией и астрономическими программами-планетариями позволяет существенно повысить точность астрономического датирования археологических памятников, а также уточнить детали их функционирования.

Астрономические методы занимают достойное место в списке естественно-научных методов археологических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Междисциплинарные исследования в археологии, этнографии и истории Сибири : материалы межд. науч. конференции, посвященной 125-летию со дня рождения ученого и общественного деятеля Николая Константиновича Ауэрбаха (1892–1930). – Красноярск : 2017. – 316 с.
2. Ларичев В. Е., Гиенко Е. Г., Паршиков С. А. Наблюдательная астрономия и системы счисления времени бронзового века Северной Хакасии // Мировоззрение населения Южной Сибири и Центральной Азии в исторической ретроспективе. – 2013. – Вып. 6. – С. 120–146.
3. Марсадолов Л. С. Комплексный подход при изучении древних святилищ и больших курганов-храмов // Методика исследования культовых комплексов : сб. ст. – Барнаул : ООО «Пять плюс», 2012. – С. 42–49.

4. Марсадолов Л. С., Паранина Г. Н. Методика и методология комплексных исследований древних сакральных мегалитических объектов // Мировоззрение населения Южной Сибири и Центральной Азии в исторической ретроспективе. – 2012. – Вып. 5. – С. 166–183.
5. Марсадолов Л. С. Временные наблюдательные астропункты VII века до н. э. в Салбыке и на Семисарте на Саяно-Алтае // *Universum Humanitarium*. – 2017. – № 2. – С. 101–109.
6. Потемкина Т. М. Пространственная и временная организация ритуального комплекса Телеутский Взвоз-I (археоастрономический аспект) // Методика исследования культовых комплексов : сб. ст. – Барнаул : ООО «Пять плюс», 2012. – С. 78–84.
7. Потемкина Т. М. Мегалитические памятники Южного Зауралья (к вопросу об особенностях функционирования) // *Астроархеология – естественно-научный инструмент познания протонаук и астральных религий жречества древних культур Хакасии* : сб. науч. тр. – Красноярск : Город, 2009. – С. 36–58.
8. Кириллов А. К., Рафикова Я. В., Фёдоров В. К. Святилище Бакшай. В поисках древней астрономической обсерватории // *Астрономические методы исследований археоастрономических объектов горной гряды «Сундуки» и других исторических объектов* : сб. тр. Всеросс. полевого семинара. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2017. – С. 139–160.
9. Полякова О. О. Методики астроархеологических исследований // *Материалы V Межд. науч. конф. «Народы и культуры Саяно-Алтая и сопредельных территорий»*. – Абакан : Хакасское книжное издательство, 2018. – С. 42–46.
10. Храм борьбы света и тьмы, добра и зла, времени и безвременья (календарно-астрономический и религиозно-мифологический аспекты сакрального памятника эпохи окунево) / В. Е. Ларичев, Е. Г. Гиенко, Г. С. Шептунов, Г. Ф. Серкин, В. Н. Комиссаров // *Россия – евразийская общность: культура и цивилизация* : материалы науч. симпозиума. – Новосибирск : Архивариус – Н, 2005. – С. 81–104.
11. Абалакин В. К., Краснорылов И. И., Плахов Ю. В. Геодезическая астрономия и астрометрия : справ. пособие. – М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 1996. – 435 с.
12. Гиенко Е. Г., Канушин В. Ф. Геодезическая астрономия : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 137 с.
13. Локьер Д. Н. Рассвет астрономии. Планеты и звезды в мифах древних народов. – М. : ЗАО Центр-полиграф, 2013. – 445 с.
14. Шараф Ш. Г., Будникова Н. А. Вековые изменения элементов орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // *Тр. Инст. теоретич. астрономии*. – Вып. XIV. – Л. : Наука, 1969. – С.48–109.
15. Тетерин Г. Н., Синянская М. Л. Точность геодезических измерений в ретроспективе и перспективе (по историческим эпохам) // *Интерэкспо Гео-Сибирь–2015. XI Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»*: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГГА, 2015. Т. 1. – С. 34–39.
16. Гиенко Е. Г., Айткулова А. Х. Обоснование точности геодезических и астрономических изысканий при астроархеологических исследованиях // *Вестник СГГА*. – 2012. – Вып. 2 (18). – С. 35–42.
17. Ларичев В. Е., Гиенко Е. Г., Паршиков С. А. Святилище «Храм времени» в Северной Хакасии: методы исследования, реконструкция его назначения // *Universum Humanitarium*. – 2017. – № 2. – С. 34–47.
18. Ларичев В. Е., Паршиков С. А., Гиенко Е. Г. Петроглифы святилища Красный камень // *Материалы V Межд. науч. конф. «Народы и культуры Саяно-Алтая и сопредельных территорий»*. – Абакан : Хакасское книжное издательство, 2018. – С. 11–26.
19. Гиенко Е. Г. Методы определения ориентировки археологических памятников // *Методика исследования культовых комплексов* : сб. ст. – Барнаул : ООО «Пять плюс», 2012. – С. 20–23.

20. Гиенко Е. Г. Определение астрономической ориентировки археологических памятников по часовому углу Солнца на примере петроглифа со спиральями (Горный Алтай) // *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*. – 2016. – № 4 (2). – С. 59–68.
21. Куницкий В. И., Гиенко Е. Г. Анализ точности метода определения ориентировки плоскостей с петроглифами по времени их освещенности Солнцем // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2017. Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 2 т.* – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 3–8.
22. Тархатинский мегалитический комплекс / В. И. Соенов, А. В. Шитов, Д. В. Черемисин, А. В. Эбель // *Древности Алтая. Известия лаборатории археологии : межвуз. сб. науч. тр.* – Горно-Алтайск, 2000. – № 5.
23. Марсадолов Л. С. Древнее святилище в Тархате на Алтае // *Археологические материалы и исследования Северной Азии в древности и средневековье : сб. ст.* – Томск, 2007. – С. 206–213.
24. Гиенко Е. Г., Маточкин Е. П., Маточкин П. Е. Солнце, Луна и тени от мегалитов на Тархатинском мегалитическом комплексе // *Гуманитарные науки в Сибири*. – 2011. – № 3. – С. 15–18.
25. Matochkin E. P., Gienko E. G. Tarhatinsky Megalithic Complex: the petroglyphs, observed are astronomical phenomena and shadow of the megaliths // *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*. – 2014. – Vol. 2 (1). – P. 90–106.
26. Солнцеголовый орел – змеборец и податель блага (к методике раскрытия семантики образов и реконструкции астральной мифологии жречества Окуневской культуры) / В. Е. Ларичев, Е. Г. Гиенко, Г. С. Шептунов, Г. Ф. Серкин, В. Н. Комиссаров // *Проблемы археологии, этнографии и антропологии Сибири и сопредельных территорий*. – Новосибирск : Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2003. Т. IX, часть I. – С. 401–408.
27. *Астрономический ежегодник на 2006 год*. – СПб. : Ин-т прикладной астрономии РАН, 2005. – 704 с.

Получено 23.10.2018

© Е. Г. Гиенко, 2018

REFINEMENT OF ASTROARCHAEOLOGY MONUMENTS DATING AND FUNCTIONING BY ASTRONOMIC-GEODETIC DATA

Elena G. Gienko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: elenagienko@yandex.ru

The paper considers differential formulas of geodetic astronomy. The application of these formulas in astroarchaeology allows eliminating the systematic errors of the initial direction azimuth and errors caused by atmospheric refraction. It is shown that using these formulas it is possible to estimate the error of astronomical dating, to clarify the place of the observer and/or the conditions of observation, to perform reduction calculations when it is impossible to establish a geodetic tool in the observation point, to clarify the astronomical dating of the archaeological monument under known circumstances of observation in present time, to simulate the chiaroscuro picture for the ancient era in astronomically significant days of the year. The possibilities of applying these formulas in combination with survey measurements, field observations, digital photography and an astro-nomic program-planetariums on the example of two astroarchaeological monuments (Mountain Altai and Khakassia) are shown. It is noted that such an integrated approach can significantly improve

the accuracy of astronomical dating of archaeological sites, as well as to clarify the details of their functioning.

Key words: astroarchaeology, geodesic astronomy, dating of archaeological sites, Lockyer's dating method, summer solstice.

REFERENCES

1. *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchyonnoj 125-letiyu so dnya rozhdeniya uchyonogo i obshchestvennogo deyatelya Nikolaya Konstantinovicha Auehrbaha (1892–1930): Mezhdisciplinarnye issledovaniya v arheologii, ehnoGRAfii i istorii Sibiri [Proceedings of the International Scientific Conference Dedicated to the 125th Birth Anniversary of the Scientist and Public Figure of Nikolai Konstantinovich Auerbach (1892–1930): Interdisciplinary Research in Archeology, Ethnography and History of Siberia]*. (2017). Krasnoyarsk, 316 p. [in Russian].
2. Larichev, V. E., Gienko, E. G., & Parshikov, S. A. (2013). Observational astronomy and notation bronze age Northern Khakassia (to the problem of astral religion of priesthood in the Okunev culture). *Mirovozzrenie naseleniya Yuzhnoj Sibiri i Central'noj Azii v istoricheskoy retrospektive [The Worldview of the Population of Southern Siberia and Central Asia in the Historical Retrospective]*, 6, 120–146 [in Russian].
3. Marsadolov, L. S. (2012). An integrated approach to the study of ancient sanctuaries and large burial mounds-temples. In *Sbornik statej: Metodika issledovaniya kul'tovyh kompleksov [Collection of Paper: Research Methodology of Cult Complexes]* (pp. 42–49). Barnaul: LLC "Five plus" Publ. [in Russian].
4. Marsadolov, L. S., & Paranina G. N. (2012). Method and methodology of complex studies of ancient sacred megalithic objects. *Mirovozzrenie naseleniya Yuzhnoj Sibiri i Central'noj Azii v istoricheskoy retrospektive [The Worldview of the Population of Southern Siberia and Central Asia in the Historical Retrospective]*, 5, 166–183 [in Russian].
5. Marsadolov, L. S. (2017). Temporary observation astronomical points of VII century BC in Salbyk and Semisart in the Sayano-Altai. *Universum Humanitarium*, 2, 101–109 [in Russian].
6. Potemkina, T. M. (2012). Spatial and temporal organization of the ritual complex of the Teleut Vzvoz-I (archeoastromical aspect). *Sbornik statej: Metodika issledovaniya kul'tovyh kompleksov [Collection of Paper: Research Methodology of Cult Complexes]* (pp. 78–84). Barnaul: LLC "Five plus" Publ. [in Russian].
7. Potemkina, T. M. (2009). Megalithic monuments of the southern Urals (to the question about the peculiarities of functioning). In *Sbornik nauchnyh trudov: Astroarheologiya – estestvennonauchnyj instrument poznaniya protonauk i astral'nyh religij zhrechestva drevnih kul'tur Hakasii [Collection of Scientific Paper: Astroarchaeology – Natural-Science Instrument of Knowledge of Protoscience and Astral Religions Priesthood of Ancient Cultures of Khakassia]* (pp. 36–58). Krasnoyarsk: Gorod Publ. [in Russian].
8. Kirillov, A. K., Rafikova, Y. V., & Fedorov, V. K. (2017). Sanctuary Bakshi. In search of an ancient astronomical Observatory. In *Sbornik trudov vserossijskogo polevogo seminara: Astronomicheskie metody issledovaniy arheoastronomicheskikh ob"ektov gornoj gryady "Sunduki" i drugih istoricheskikh ob"ektov [Proceedings of All-Russian Field Workshop: Astronomical Research Methods of Archaeoastronomic Objects of the Mountain Range "Chests" and Other Historical Objects]* (pp. 139–160). Novosibirsk: CPI NSU Publ. [in Russian].
9. Polyakova, O. O. (2018). Methods astroarchaeology research. In *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii: Narody i kul'tury Sayano-Altaya i sopredel'nyh territorij [Proceedings of the V International Scientific Conference: Peoples and Cultures of Sayano-Altai and Adjacent Territories]* (pp. 42–46). Abakan: Khakass Publ. [in Russian].

10. Larichev, V. E., Gienko, E. G., Sheptunov, G. S., Serkin, G. F., & Komissarov, V. N. (2005). The temple of the struggle of light and darkness, good and evil, time and timelessness (calendar-astronomical and religious-mythological aspects of the sacred monument of the era Okunevo). In *Sbornik materialov nauchogo simpoziuma: Rossiya – evrazijskaya obshchnost': kul'tura i civilizaciya [Proceedings of the Research Symposium: Russia-Eurasian Community: Culture and Civilization]* (pp. 81–104). Novosibirsk: "Archivarius-N" Publ. [in Russian].
11. Abalakin, V. K., Krasnorylov, I. I., & Plaxov, Yu. V. (1996). *Geodezicheskaya astronomiya i astrometriya [Geodetic astronomy and astrometry]*. Moscow: Kartocentr-Geodezizdat Publ., 435 p. [in Russian].
12. Gienko, E. G., & Kanushin, V. F. (2006). *Geodezicheskaya astronomiya [Geodetic astronomy]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 137 p. [in Russian].
13. Lokyer, D. N. (2013). *Rassvet astronomii. Planety i zvezdy v mifakh drevnih narodov [The dawn of astronomy. Planets and stars in the myths of ancient peoples]*. Moscow: ZAO Tsentrpoligraf, 445 p. [in Russian].
14. Sharaf, Sh. G., & Budnikova, N. A. (1969). Secular variation in the elements of the earth's orbit and the astronomical theory of climate fluctuations. In *Sbornik Trudov Instituta teoreticheskoy astronomii: T. XIV [Proceedings of Institute Theoretical Astronomies: Vol. XIV]*. (pp. 48–109). Leningrad: Nauka Publ. [in Russian].
15. Teterin, G. N., & Sinyanskaya, M. L. (2015). The accuracy of geodetic measurements in retrospective and perspective (historical eras). In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Kartography, Geoinformatics and Mine Surveying]* (pp. 34–39). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
16. Gienko, E. G., & Ajtkulova, A. X. (2012). The foundation of the accuracy of geodetic and astronomical measurements in astroarchaeology researches. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 2(18), 35–42 [in Russian].
17. Larichev, V. E., Gienko, E. G., & Parshikov, S. A. (2017). Sanctuary "The Temple of time" in Northern Khakassia: methods of research, reconstruction of its appointment. *Universum Humanitarium*, 2, 34–47 [in Russian].
18. Larichev, V. E., Parshikov, S. A. & Gienko, E. G. (2018). Petroglyphs of the sanctuary, the Red stone. *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii: Narody i kul'tury Sayano-Altaya i sopredel'nyh territorij [Proceedings of the V International Scientific Conference: Peoples and Cultures of Sayano-Altai and Adjacent Territories]* (pp. 11–26). Abakan: Khakass Publ.
19. Gienko, E. G. (2012). Methods of determining the orientations of archaeological monuments. In *Sbornik statej: Metodika issledovaniya kul'tovyh kompleksov [Collection of Paper: Research Methodology of Cult Complexes]* (pp. 20–23). Barnaul: LLC "Five plus" Publ. [in Russian].
20. Gienko, E. G. (2016). Determination of astronomical orientation of archaeological sites on the hour angle of the Sun on the example of petroglyph spiral (Mountain Altai). *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*, 4(2), 59–68 [in Russian].
21. Kunitsky, V. I., & Gienko, E. G. (2017). The accuracy analysis of the method of determining the orientation of the planes with petroglyphs by the time of the sun illumination. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2017: T. 2. Magisterskaya nauchnaya sessiya "Pervye shagi v nauke" [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: Vol. 2. Master's Scientific Session "First steps in science"]* (pp. 3–8). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
22. Soenov, V. I., Shitov, A. V., Cheremisina, D. V., & Ebel A. V. (2000). Tarhatinsky megalithic complex. In *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov: Drevnosti Altaya. Izvestiya laboratorii arheologii [Interuniversity Collection of Scientific Works: News of the Laboratory of Archeology]*. Gorno-Altaysk, No. 5 [in Russian].

23. Marsadolov, L. S. (2007). Ancient sanctuary in Tarhata in the Altay. In *Sbornik statej: Arheologicheskie materialy i issledovaniya Severnoj Azii v drevnosti i srednevekov'e* [Collection of Articles: Archaeology Materials and Research of Northern Asia in Ancient Times and the Middle Ages] (pp. 206–213). Tomsk [in Russian].

24. Gienko, E. G., Matochkin, E. P., & Matochkin, P. E. (2011). The Sun, the Moon and Shades in the Tarhatinsky Megalithic Complex. *Gumanitarnye nauki v Sibiri* [Humanitarian Sciences in Siberia], 3, 15–18 [in Russian].

25. Matochkin, E. P., & Gienko, E. G. (2014). Tarhatinsky Megalithic Complex: the petroglyphs, observed are astronomical phenomena and shadow of the megaliths. *Archaeoastronomy and Ancient Technologies*, 2(1), 90–106 [in Russian].

26. Larichev, V. E., Gienko, E. G., Sheptunov, G. S., Serkin, G. F., & Komissarov, V. N. (2003). Sun-headed eagle – serpentine and giver of the good (to the method of disclosure of the semantics of images and reconstruction of the astral mythology of the priesthood of Okun culture). In *Problemy arheologii, ehtnografii i antropologii Sibiri i sopredel'nyh territorij: T. IX, ch. I* [Problems of Archaeology, Ethnography and anthropology of Siberia and adjacent territories: Vol. IX, part I] (pp. 401–408). Novosibirsk: Institute of Archeology and Ethnography SB RAS Publ. [in Russian].

27. *Astronomicheskij ezhegodnik na 2006 god* [The astronomical Yearbook for 2006]. (2005). St. Petersburg: Institute of applied astronomy of RAS Publ., 704 p. [in Russian].

Received 23.10.2018

© E. G. Gienko, 2018

УДК 551.521+551:507.362.2+[528.92/.94:001.891.57]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПОВ И КОЛИЧЕСТВА ОБЛАЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ФАКТОРА МУТНОСТИ ЛИНКЕ И ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Алексей Вячеславович Доброхотов

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Агрофизический научно-исследовательский институт, 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, научный сотрудник, тел. (812)534-09-75, e-mail: dobralexey@gmail.com

Суммарная радиация является ключевой составляющей уравнения радиационного баланса, который является важной частью энергетического баланса. Пространственное распределение суммарной радиации необходимо при расчетах по энергобалансовым моделям, основанным на спутниковых измерениях. Суммарная радиация зависит от географического положения, рельефа, условий прозрачности атмосферы, облачности. В основном учет облачности при расчете суммарной радиации для энергобалансовых моделей происходит по данным наземных измерений продолжительности солнечного сияния, в то время как на территории России стандартными являются визуальные наблюдения типов и количества облачности. Условия прозрачности атмосферы обычно учитываются по данным наземных метеорологических измерений, которые не всегда отражают поглощение радиации во всей толще атмосферы. Условия прозрачности могут быть также определены по данным дистанционного зондирования. В данной работе рассматривается метод определения пространственного распределения суммарной радиации по визуальным наблюдениям облачности на метеостанциях и спутниковым измерениям условий прозрачности атмосферы. Крутизна и экспозиция склонов для учета пространственного распределения суммарной радиации рассчитывались с использованием данных цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEM с пространственным разрешением 30 м. Условия прозрачности атмосферы характеризовались фактором мутности Линке по данным спутниковых измерений в системе NOAA CLASS на сетке $1 \times 1^\circ$. Для валидации расчетов были использованы данные радиационных измерений проекта World Bank's ESMAP Solar Resource Mapping. Среднеквадратическая ошибка получилась равной 107,6 и 83,9 Вт/м² для двух станций. В результате была разработана компьютерная программа автоматического определения пространственного распределения суммарной радиации.

Ключевые слова: карты суммарной радиации, визуальные наблюдения облачности, цифровая модель рельефа, фактор мутности Линке.

Введение

Солнечное излучение, падающее на поверхность Земли, является результатом сложных взаимодействий энергии в атмосфере. В глобальном масштабе градиенты излучения обусловлены геометрией Земли и ее вращением, а также вращением вокруг Солнца. В региональных и локальных масштабах рельеф местности является основным фактором, изменяющим распределение излучения. Изменчивость высоты, крутизны, экспозиции, а также тени, создаваемые рельефом местности, вызывают сильные локальные градиенты. Пространственная и временная изменчивость солнечной энергии определяет динамику многих

ландшафтных процессов, например, различия температуры воздуха и почвы, увлажненности, таяния снега, фотосинтеза и суммарного испарения [1]. Данные солнечной радиации, распределенные по пространству, могут находить различное применение (климатология, экология, ландшафтный дизайн, землепользование и т. д.).

Суммарная радиация, или приходящая коротковолновая радиация, является суммой рассеянной радиации, которая была рассеяна атмосферой и облаками, и прямой радиации, которая не была рассеяна при прохождении лучей через атмосферу.

Наибольшее влияние на поток суммарной радиации оказывают следующие факторы:

1. Географическое положение и рельеф. Широта и долгота места оказывают значительное влияние на распределение суммарной радиации. Также большое значение имеют параметры рельефа, так как различная экспозиция и крутизна склонов могут приводить к большим различиям суммарной радиации на соседних участках. Также необходимо учитывать возможность затенения участков соседними склонами.

2. Степень облачности. Облачность может как уменьшать, так и увеличивать суммарную радиацию за счет увеличения рассеянной радиации. В основном облачность уменьшает приход суммарной радиации за счет рассеяния и поглощения. На поступление суммарной радиации влияют как количество, так и форма облачности.

3. Высота Солнца. Высота Солнца определяет оптическую массу атмосферы в направлении Солнца. При большей оптической массе атмосферы солнечные лучи проходят больший путь сквозь атмосферу.

4. Условия прозрачности атмосферы. Различная концентрация атмосферных газов и аэрозолей может оказывать значительное влияние на прозрачность атмосферы.

Суммарная радиация является ключевой составляющей радиационного баланса, который является важной частью энергетического баланса. Пространственное распределение суммарной радиации необходимо при моделировании энергетического баланса на основе спутниковых измерений [2–5]. Рельеф может учитываться через крутизну и экспозицию склонов, которые могут быть рассчитаны с помощью цифровой модели рельефа. Для учета влияния облачности обычно используют измеренную на автоматических метеостанциях продолжительность солнечного сияния. Однако на территории России стандартными являются визуальные наблюдения форм и количества облачности. Существующие методы коррекции суммарной радиации в зависимости от облачности требуют модификации для применения на данных визуальных наблюдений стандартной сети метеорологических станций. Условия прозрачности атмосферы обычно учитываются по данным наземных измерений [3], которые не всегда отражают поглощение радиации во всей толще атмосферы. Существуют также системы спутникового мониторинга условий прозрачности атмосферы [6].

Материалы и методы исследования

Для расчета суммарной радиации в зависимости от типов и количества облачности по ярусам были использованы зависимости, полученные в модели CLS (Cloud Layer Sunshine) [7]. Модель CLS требует для расчета суммарной радиации значения прямой и рассеянной радиации для безоблачного неба.

Прямая радиация, ослабленная безоблачной атмосферой ($S_{\downarrow 0}$, Вт/м²), рассчитывалась следующим образом:

$$S_{\downarrow 0} = G_0 \cdot \exp(-0,866 2T_{LK} \cdot m \cdot \delta_R(m)), \quad (1)$$

где G_0 – излучение, приходящее на верхнюю границу атмосферы, Вт/м²; T_{LK} – фактор мутности Линке [8]; m – оптическая масса атмосферы. Параметр $\delta_R(m)$ представляет собой оптическую толщину атмосферы и рассчитывается через оптическую массу атмосферы m [8].

Излучение, приходящее на верхнюю границу атмосферы G_0 , может быть определено по географическому положению рассматриваемого участка и расчетной дате [9]. Фактор мутности Линке T_{LK} был получен из данных спутникового мониторинга комплексной системы управления большими массивами данных NOAA CLASS. Система предоставляет данные о факторе мутности Линке на сетке $1 \times 1^\circ$. Оптическая масса атмосферы может быть рассчитана через зенитный угол, который зависит от географического положения, даты и времени суток [10].

Рассеянная радиация для безоблачного неба $D_{\downarrow 0}$ рассчитывалась по следующей формуле:

$$D_{\downarrow 0} = G_0 \cdot T_n(T_{LK}) \cdot F_d(h_0), \quad (2)$$

где T_n – функция пропускания для рассеянной радиации, зависит от фактора мутности Линке T_{LK} ; F_d – функция высоты солнца, зависит от высоты Солнца h_0 [11].

Параметры рельефа, такие как крутизна и экспозиция склонов, необходимые для расчета прямой и рассеянной радиации на наклонной поверхности оценивались с помощью интерполяции на ЦМР по методу Митасовой [12]. Также определялись участки затенения поверхности рельефом [13]. Для учета параметров рельефа была использована глобальная ЦМР ASTER GDEM с пространственным разрешением 30 м.

В модели CLS одним из входных параметров является продолжительность солнечного сияния. Так как измерения продолжительности солнечного сияния не присутствуют в стандартной программе наблюдений на станциях гидрометеосети, продолжительность солнечного сияния определялась через общее количество облачности [14]

$$s = s_0(1 - n), \quad (3)$$

где s – продолжительность солнечного сияния; s_0 – максимально возможная продолжительность солнечного сияния; n – общее количество облачности. Максимально возможная продолжительность солнечного сияния s_0 определялась в зависимости от географического положения [9].

С учетом ослабления облачностью часовые суммы прямой радиации (S_{\downarrow} , кДж/м²) по модели CLS рассчитывались как

$$S_{\downarrow} = [(1 - n_e) - n_{Ci}(1 - t_{Ci})]S_{\downarrow 0}, \quad (4)$$

где n_e – эффективное количество облачности; n_{Ci} – количество облаков перистых форм; t_{Ci} – коэффициент пропускания для облачности перистых форм

$$n_e = \frac{An_s + B(1 - s)}{A + B}, \quad (5)$$

где n_s – суммарное количество облачности, наблюдаемое с поверхности, за исключением перистых форм; A и B – взвешенные коэффициенты для измерений облачности и солнечного сияния (были использованы значения $A = 2$, $B = 1$).

Часовые суммы рассеянной радиации (D_{\downarrow} , кДж/м²) складывались из четырех слагаемых: рассеянной радиации для безоблачной части неба; неба, занятого перистыми формами; неба, занятого облачностью форм, отличных от перистых; множественных отражений. Для безоблачной части неба рассеянная радиация ($D_{\downarrow cs}$) рассчитывалась как

$$D_{\downarrow cs} = (1 - n)D_{\downarrow 0}. \quad (6)$$

Для части неба, занятого перистыми формами, рассеянная радиация ($D_{\downarrow Ci}$) рассчитывалась как

$$D_{\downarrow Ci} = n_{Ci}t_{Ci}D_{\downarrow 0}. \quad (7)$$

Для части неба, занятого облачностью форм, отличных от перистых, рассеянная радиация ($D_{\downarrow cy}$) рассчитывалась с учетом трех ярусов облачности. Была проведена коррекция баллов облачности, так как возникает эффект перекрытия, который наблюдатель не способен зафиксировать. В данной модели [15] сделано предположение, что количество облачности в определенном слое зависит от количества облачности нижележащего слоя

$$n_i = n'_i / (1 - n_r), \quad (8)$$

где n_i – скорректированное количество облачности в определенном слое; n'_i – наблюдаемое количество облачности в определенном слое; n_r – суммарное наблюдаемое количество облачности в нижележащих слоях.

В работе [16] коэффициенты пропускания были определены для облачности различных типов

$$t_i = \left(\frac{1}{R_{S\downarrow 0}} \right) \left(\frac{a}{m} \right) e^{-bm}, \quad (9)$$

где $R_{S\downarrow 0}$ – суммарная радиация при безоблачном небе; a , b – эмпирические коэффициенты. Значения t_{Ci} так же рассчитываются по формуле (9).

Коэффициенты пропускания (t_i) используются для определения индивидуальных коэффициентов пропускания (ψ_i) в каждом ярусе облачности

$$\psi_i = 1 - (1 - t_i) \frac{n_i}{n_s}. \quad (10)$$

В итоге, рассеянная радиация для части неба, занятого облачностью форм, отличных от перистых, рассчитывалась как

$$D_{\downarrow cy} = n_s R_{S\downarrow 0} \prod_{i=1}^j \psi_i, \quad (11)$$

где j – номер яруса.

Множественные отражения ($D_{\downarrow mr}$) определялись по следующей формуле:

$$D_{\downarrow mr} = (S_{\downarrow} + D_{\downarrow cs} + D_{\downarrow Ci} + D_{\downarrow cy}) \alpha (\alpha_c n_s + \alpha_{Ci} n_{Ci}), \quad (12)$$

где α – альbedo подстилающей поверхности; α_c , α_{Ci} – альbedo неперистых и перистых форм облачности соответственно. Перистые и неперистые формы облачности имеют различное альbedo [17, 18]. Следуя работам [15, 19], альbedo для неперистых форм облачности принимает значение 0,6. Альbedo для перистых форм облаков меньше, чем для неперистых форм, и принималось равным 0,2 [20, 21]. Значение альbedo поверхности может быть получено из отражения в спектральных каналах при спутниковой съемке [22]. Также можно воспользоваться средними значениями альbedo для различных типов подстилающей поверхности [1].

Итоговая формула для расчета суммарной радиации с учетом типов и форм облачности имеет вид

$$R_{S\downarrow} = \left[\left[(1 - n_e) - n_{Ci} (1 - t_{Ci}) \right] S_{\downarrow 0} + \left[(1 - n) + n_{Ci} t_{Ci} \right] D_{\downarrow 0} + n_s R_{S\downarrow 0} \prod_{i=1}^j \psi_i \right] \times \left[1 + \alpha (\alpha_c n_s + \alpha_{Ci} n_{Ci}) \right]. \quad (13)$$

Для расчета влияния облачности на суммарную радиацию по модели CLS были использованы данные визуальных наблюдений типов и количества облачности на метеорологических станциях. В синоптическом коде не всегда ясно количество облачности всех трех ярусов, так как для баллов облачности присутствует только два поля: «Общее количество облачности» и «Количество облачности нижнего яруса». Так, например, в поле «Количество облачности нижнего яруса» при наличии всех трех ярусов будет закодирована облачность нижнего яруса, в то время как в поле «Общее количество облачности» будет закодирована облачность всех трех ярусов. Таким образом, было принято следующее допущение: когда в наблюдениях присутствует облачность всех трех ярусов, наблюдаемое количество облачности нижнего яруса считается равным значению поля «Количество облачности нижнего яруса», а наблюдаемое количество облачности среднего и верхнего ярусов рассчитывается как среднее арифметическое разности полей «Общее количество облачности» и «Количество облачности нижнего яруса». Расчет суммарной радиации осуществлялся с часовым интервалом. Была произведена линейная интерполяция количества облачности и коэффициентов пропускания для трех ярусов облачности, так как на метеорологических станциях стандартной сети принят трехчасовой интервал между наблюдениями.

Результаты и обсуждения

Для валидации метода расчета суммарной радиации в зависимости от форм и количества облачности были использованы данные радиационных измерений проекта World Bank's ESMAP Solar Resource Mapping. Суммарная радиация измерялась пиранометром Kipp&Zonen CMP21. Были выбраны станции YerevanAgro и Islamadab (табл. 1), так как они близко расположены к метеорологическим станциям стандартной сети: Ереван/Звартноц (WMO ID = 37788) и Исламабад (WMO ID = 41 571), а также программа наблюдений совпадает с программой на территории России. Для участков, на которых находились станции YerevanAgro и Islamadab с портала геологической службы США были получены ЦМР ASTER GDEM. Для расчетов множественных отражений было выбрано значение альбедо, равное 0,2, соответствующее отражению растительной поверхности.

Таблица 1

Основные характеристики станций YerevanAgro и Islamadab

Название станции	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря, м	Период измерений, мин	Сдвиг времени от UTC, час
YerevanAgro	40°11'19" с. ш.	44°23'51" в. д.	946	10	+3
Islamadab	33°38'52" с. ш.	72°59'04" в. д.	500	10	+5

Для определения суммарной радиации была написана специальная компьютерная программа, позволяющая рассчитывать карты суммарной радиации с часовым интервалом, отталкиваясь от данных ЦМР, данных о дате, времени и облачности из метеонаблюдений и данных фактора мутности Линке, автоматически загружаемых из системы NOAA CLASS. Компьютерная программа была написана на языке Python с использованием библиотек для быстрой работы с массивами и таблицами – numpy, pandas; для выполнения астрономических вычислений – ephem; для работы с файлами NetCDF – netcdf, netCDF4; для работы с геоданными – gdal; для подключения модулей ГИС GRASS GIS – GRASS GIS Python script package.

На рис. 1, 2 представлены диаграммы рассеяния между расчетными (модельными) и измеренными значениями суммарной радиации для двух станций. «Линия 1:1» представляет гипотетическую линию, которая получается в том случае, когда измеренные и модельные значения абсолютно совпадают.

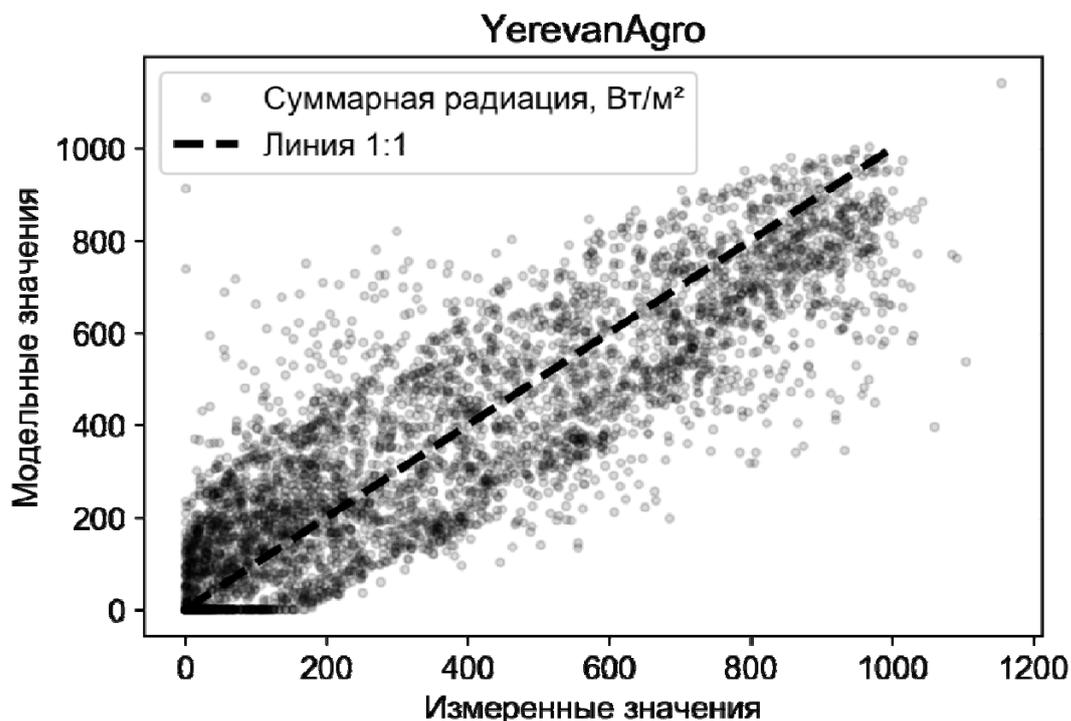


Рис. 1. Диаграмма рассеяния для измеренных и расчетных (модельных) значений суммарной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) для станции YerevanAgro

В табл. 2 представлены результаты статистического анализа сравнения модельных и измеренных значений суммарной радиации. На рис. 3, 4 представлены примеры рассчитанных карт пространственного распределения суммарной радиации на участках ЦМР со станциями YerevanAgro и Islamabad. На участке

со станцией YerevanAgro представлен расчет за 13 часов 2 июня 2017 г., на участке со станцией Islamabad – за 13 часов 13 июля 2016 г.

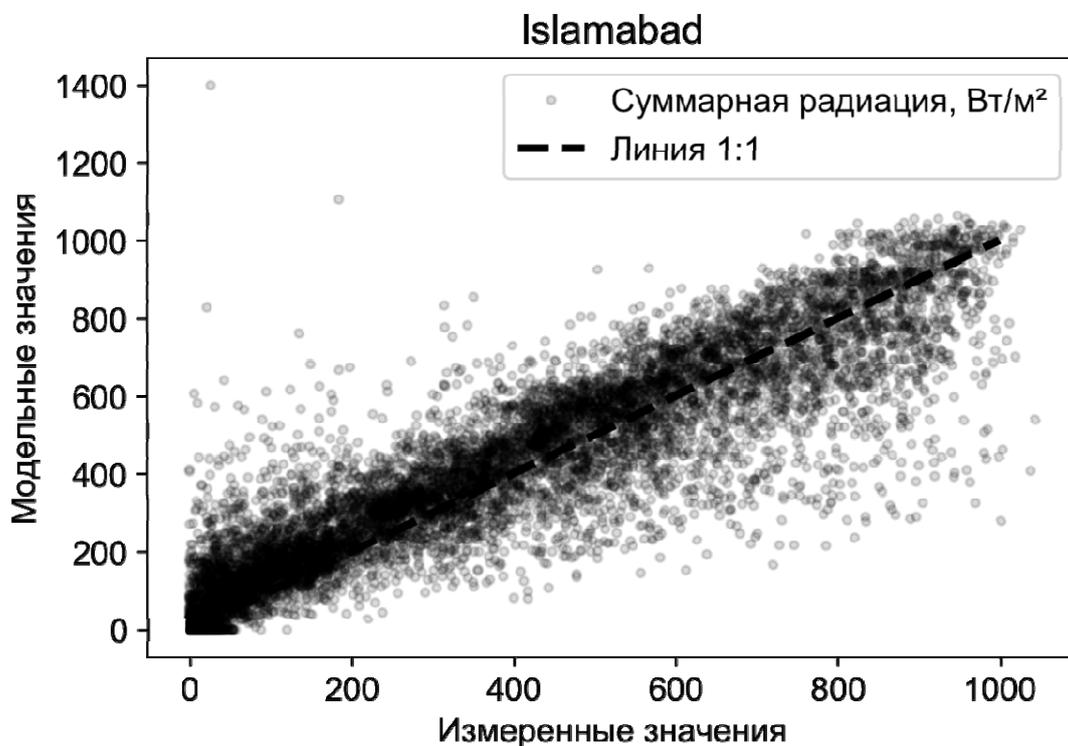


Рис. 2. Диаграмма рассеяния для измеренных и расчетных (модельных) значений суммарной радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) для станции Islamabad

Таблица 2

Статистические показатели сравнения расчетных и измеренных значений суммарной радиации

Статистический показатель:	YerevanAgro	Islamadab
RMSE ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	107,6	83,9
d	0,96	0,98
NSE	0,83	0,91
r	0,93	0,95
Среднее измеренное значение ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	189,9	184,8
Среднее рассчитанное значение ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	186,4	197,0

В табл. 2: RMSE – среднеквадратическая ошибка; d – индекс согласия Вильмотта; NSE – коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклиффа; r – коэффициент корреляции.

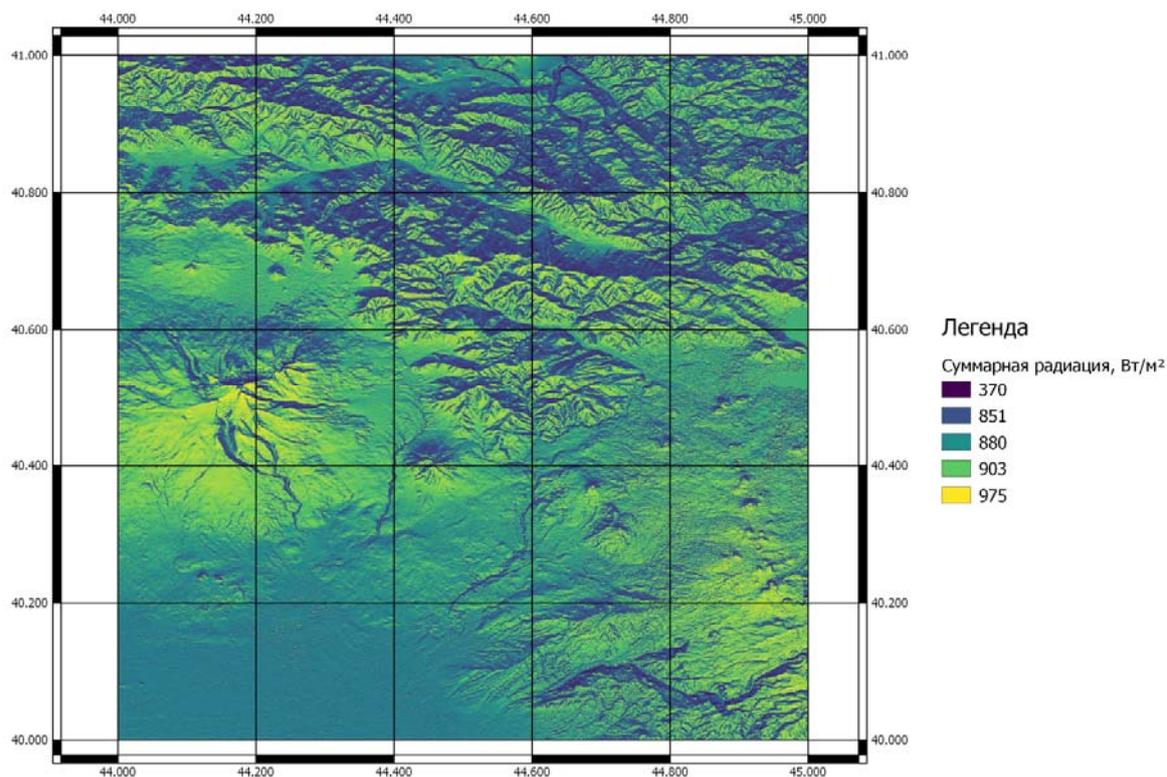


Рис. 3. Карта суммарной радиации на участке ЦМР над станцией Yerevan Agro

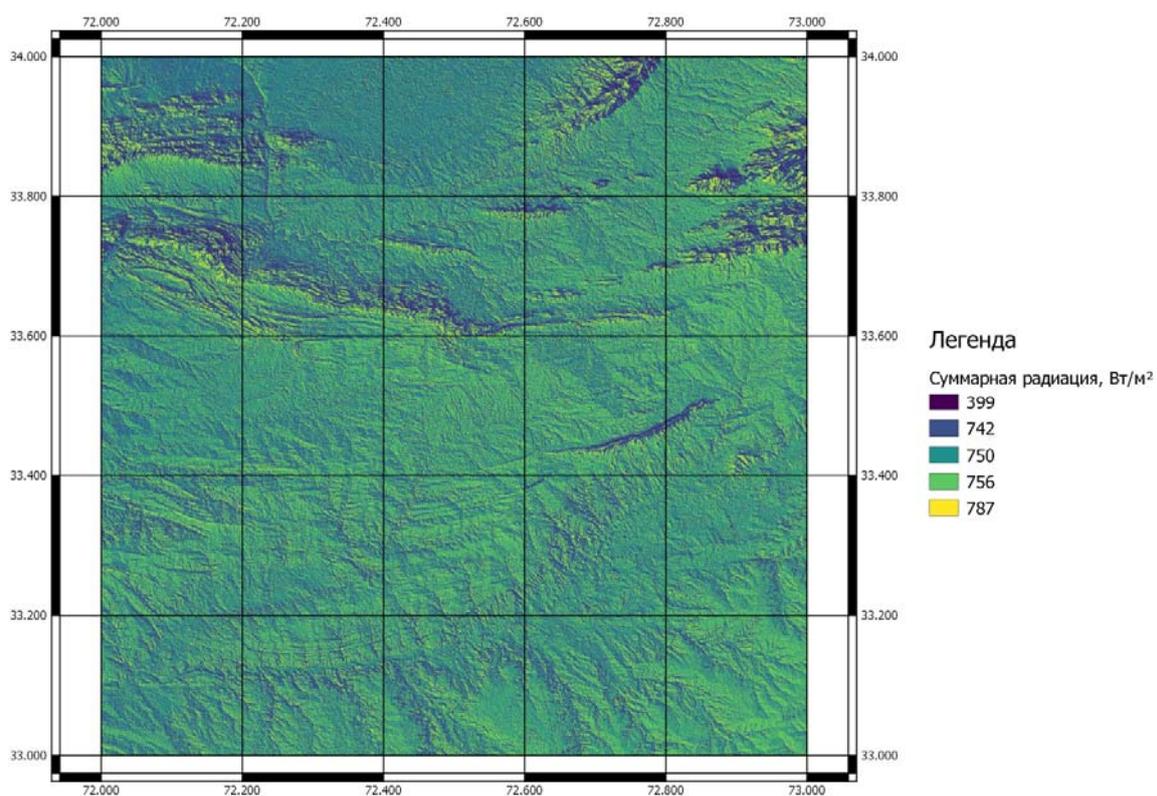


Рис. 4. Карта суммарной радиации на участке ЦМР над станцией Islamabad

Заключение

Предложен метод определения пространственного распределения суммарной радиации с интервалом в один час с учетом географического положения, рельефа, высоты Солнца, прозрачности атмосферы, форм и количества облачности. Метод использует данные ЦМР, дистанционные измерения фактора мутности Линке, данные визуальных наблюдений типов и количества облачности на станциях стандартной гидрометеосети. При сравнении расчетных и измеренных величин суммарной радиации, значения среднеквадратической ошибки составили $107,6 \text{ Вт/м}^2$ и $83,9 \text{ Вт/м}^2$ для двух станций. На основе предложенного метода написана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать процесс расчета пространственного распределения суммарной радиации. Компьютерная программа может быть использована как часть системы расчета составляющих энергетического баланса подстилающей поверхности, которые являются важнейшими характеристиками экосистемы. В дальнейшем необходимо провести валидацию метода расчета пространственного распределения суммарной радиации на территории России с использованием высокоточных пиранометров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондратьев К. Я. Актинометрия. – Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 690 с.
2. Bastiaanssen W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation // Journal of hydrology. – 1998. – Vol. 212 – P. 198–212.
3. Allen R. G., Tasumi M., Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model // Journal of irrigation and drainage engineering. – 2007. – Vol. 133, No. 4. – P. 380–394.
4. Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes // Hydrology and earth system sciences. – 2002. – Vol. 6, No. 1. – P. 85–100.
5. Roerink G. J., Zhongbo Su, Menenti M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance // Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. – 2000. – Vol. 25, No. 2. – P. 147–157.
6. Remund J. et al. Worldwide Linke turbidity information // ISES Solar World Congress. International Solar Energy Society (ISES). 2003. – Vol. 400. 13 p.
7. Suckling P. W., Hay J. E. A cloud layer - sunshine model for estimating direct, diffuse and total solar radiation // Atmosphere. – 1977. – Vol. 15, No. 4. – P. 194–207.
8. Kasten F. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness // Solar energy. – 1996. – Vol. 56, No. 3. – P. 239–244.
9. Allen R. G. FAO irrigation and drainage paper No. 56. – Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. – Vol. 56, No. 97. – 333 p.
10. Семенченко Б. А. Физическая метеорология. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 417 с.
11. Scharmer K. The European solar radiation atlas. Vol. 2: Database and exploitation software, 2000. – 118 p.
12. Mitášová H., Hofierka J. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis // Mathematical Geology. – 1993. – Vol. 25, No. 6. – P. 657–669.

13. Muneer T. Solar radiation model for Europe // Building services engineering research and technology. – 1990. – Vol. 11, No. 4. – P. 153–163.
14. Badescu V. A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global solar irradiance // Theoretical and Applied Climatology. – 2002. – Vol. 72, No. 1. – P. 27–136.
15. Davies J. A., Schertzer W., Nunez M. Estimating global solar radiation // Boundary-Layer Meteor. – 1975. – Vol. 9. – P. 33–52.
16. Haurwitz B. Insolation in relation to cloud type // J. Meteor. – 1948. – Vol. 5. – P. 110–113.
17. Canover J. H. Cloud and terrestrial albedo determinations from Tiros satellite pictures // J. Appl. Meteor. – 1965. – Vol. 4. – P. 378–386.
18. Liou K. N. On the absorption, reflection and transmission of solar radiation in cloudy Atmospheres // J. Atmos. Sci. – 1976. – Vol. 33. – P. 798–805.
19. Hay J. E. A revised method for determining the direct and diffuse components of the total short-wave radiation // Atmosphere. – 1976. – Vol. 14, No. 4. – P. 278–287.
20. Drummond A. J., Hickey J. R. Large-scale reflection and absorption of solar radiation by clouds as influencing earth radiation budget: New aircraft measurement // International Conference on Weather Modification. – Canberra : Australian Academy of Science and American Meteorological Society, 1971. – P. 267–276.
21. London J. A Study of the Atmospheric HeatBalance : Final Report No. AF. 19(122)-165. – New York University, Department of Meteorology and Oceanography, 1957. –75 p.
22. Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms // Remote sensing of environment. – 2001. – Vol. 76, No. 2. – P. 213–238.

Получено 18.07.2018

© А. В. Доброхотов, 2018

ESTIMATION OF THE GLOBAL RADIATION SPATIAL DISTRIBUTION DEPENDING ON FORMS AND AMOUNT OF CLOUDS WITH THE SATELLITE DATA OF LINKE TURBIDITY COEFFICIENT AND DIGITAL ELEVATION MODEL

Aleksei V. Dobrokhотов

Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskiy Prospect St., Saint-Petersburg, 195220, Russia, Researcher, phone: (812)534-09-75, e-mail: dobralekey@gmail.com

The global radiation is a key component of the radiation balance equation, which is an important part of the energy balance. Spatial distribution of the global radiation is necessary for surface energy balance models based on the satellite data. The global radiation depends on the geographical location, the relief, the atmospheric transmissivity, and the clouds. Basically, for energy balance models, ground-based measurements of the sunshine duration are used to calculate the global radiation. While on the territory of Russia the visual observations of types and amounts of clouds are standard. The atmospheric transmissivity is usually estimated from ground-based measurements, which do not always indicate the radiation absorption throughout the atmosphere. The atmospheric transmissivity can also be determined from remote sensing data. In this paper we consider a method for estimating global radiation with the visual observation of forms and amount of clouds at meteorological stations and with remote measurements of the atmospheric transmissivity. Slope and aspect are calculated by digital elevation model (DEM) ASTER GDEM to estimate the global radiation spatial distribution. The spatial resolution of ASTER GDEM is 30 m. The atmospheric transmissivity was estimated with satellite measurements of Linke turbidity coefficient, the measurements on the grid $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ are stored in NOAA CLASS system. The radiation measurements

data in the World Bank's ESMAP Solar Resource Mapping project were used to validate the calculations. The root-mean-square error was 107.6 W/m^2 and 83.9 W/m^2 for two stations. As a result, a computer program was developed to automatically calculate the global radiation spatial distribution.

Key words: global radiation maps, cloudiness visual observations, digital elevation model, Linke turbidity coefficient.

REFERENCES

1. Kondratiev, K. Ya. (1965). *Aktinometriya [Actinometry]*. Leningrad: Hydrometeorological Publ., 690 p. [in Russian].
2. Bastiaanssen, W. G. M., et al. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198–212.
3. Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394.
4. Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100.
5. Roerink, G. J., Zhongbo, Su, & Menenti, (2000). M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2), 147–157.
6. Remund J., et al. (2003). Worldwide Linke turbidity information. *ISES Solar World Congress. International Solar Energy Society (ISES): Vol. 400*, 13 p.
7. Suckling, P. W., & Hay, J. E. (1977). A cloud layer - sunshine model for estimating direct, diffuse and total solar radiation. *Atmosphere*, 15(4), 194–207.
8. Kasten, F. (1996). The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy*, 56(3), 239–244.
9. Allen, R. G. (1998). *FAO irrigation and drainage paper: Vol. 56. No. 97*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 333 p.
10. Semenchko, B. A. (2002). *Fizicheskaya meteorologiya [Physical meteorology]*. Moscow: Aspect Press, 417 p. [in Russian].
11. Scharmer, K. (2000). *The European solar radiation atlas. Vol. 2: Database and exploitation software*, 118 p.
12. Mitášová, H., & Hofierka, J. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25(6), 657–669.
13. Muneer, T. (1990). Solar radiation model for Europe. *Building Services Engineering Research and Technology*, 11(4), 153–163.
14. Badescu, V. (2002). A new kind of cloudy sky model to compute instantaneous values of diffuse and global solar irradiance. *Theoretical and Applied Climatology*, 72(1), 27–136.
15. Davies, J. A., Schertzer, W., & Nunez, M. (1975). Estimating global solar radiation. *Boundary-Layer Meteorol*, 9, 33–52.
16. Haurwitz, B. (1948). Insolation in relation to cloud type. *J. Meteor*, 5, 110–113.
17. Canover, J. H. (1965). Cloud and terrestrial albedo determinations from Tiros satellite pictures. *J. Appl. Meteor*, 4, 378–386.
18. Liou, K. N. (1976). On the absorption, reflection and transmission of solar radiation in cloudy Atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 33, 798–805.
19. Hay, J. E. (1976). A revised method for determining the direct and diffuse components of the total short-wave radiation. *Atmosphere*, 14(4), 278–287.
20. Drummond, A. J., & Hickey, J. R. (1971). Large-scale reflection and absorption of solar radiation by clouds as influencing earth radiation budget: New aircraft measurement. *International*

Conference on Weather Modification. – Canberra: Australian Academy of Science and American Meteorological Society (pp. 267–276).

21. London, J. A. (1957). Study of the Atmospheric HeatBalance: Final Report No. AF. 19(122)–165. New York University, Department of Meteorology and Oceanography, 75 p.

22. Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 213–238.

Received 18.07.2018

© A. V. Dobrokhotov, 2018

УДК 551.2/.3:528.087

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВТОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Юрий Олегович Кузьмин

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Россия, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1, доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделением разведочной геофизики и прикладной геодинамики, тел. (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Рассматриваются вопросы идентификации результатов повторных геодезических наблюдений. Показано, что отсутствие адекватного определения вида, характера и типа регионального нагружения разломно-блоковой геологической среды, а также отсутствие учета относительного характера измеренных смещений приводит к неверной геодинамической интерпретации результатов повторных геодезических наблюдений. В частности, приведена информация по изучению деформаций земной поверхности, проведенных методами спутниковой и наземной геодезии в различных регионах и пространственно-временных масштабах, которая показывает, что скорости среднегодовых относительных деформаций лежат в диапазоне 10^{-8} – 10^{-9} в год и слабо зависят от базы и продолжительности периода наблюдений. Полагая, что скорость деформаций линейно пропорциональна скорости приложенных напряжений, при типичных значениях жесткости среды скорости изменения региональных напряжений будут составлять величины порядка 10–100 Па в год или 0,1–1 мбар (0,1–1 атм) в год. Это означает «мягкий» режим регионального нагружения. Выведены формулы взаимосвязи между величинами относительных деформаций изгиба, кривизной земной поверхности и радиусом этой кривизны. Представлен вариант оценки геодинамической опасности объектов недропользования, расположенных вблизи зон активных разломов. Этот подход продемонстрирован на примере анализа результатов повторных нивелирных наблюдений на геодинамическом полигоне, организованном в пределах Ромашкинского нефтяного месторождения.

Ключевые слова: повторные геодезические наблюдения, геодинамическая опасность, тензор деформации, локальный изгиб, идентификация результатов наблюдений, опасный разлом.

Введение

Под идентификацией результатов наблюдений, как правило, понимается установление параметров модели (механизма) изучаемого явления по результатам их измерения. При этом качество (адекватность) идентификации определяется как уровнем метрологической обеспеченности измерений, так и степенью изученности свойств объекта, включенного в количественную или качественную модель исследуемого явления природы [1].

Базовой процедурой при проведении оценки уровня геодинамической опасности любых объектов, расположенных на земной поверхности, включая объекты обустройства месторождений полезных ископаемых, является сопоставление измеренных в результате геодинамического мониторинга деформаций земной поверхности с нормативно-допустимыми значениями. В случае, когда

измеренный уровень деформаций участка земной поверхности сопоставим или превосходит нормативные значения, данный участок является геодинамически опасным для объектов, расположенных в его пределах [2].

Как известно, непосредственно измеряемой величиной в напряженно-деформируемом состоянии любого объекта, являются движения, а напряжения вычисляются по измеренным смещениям (деформации) в соответствии с реологическими характеристиками деформируемой среды. Поэтому в нормативных документах, регламентирующих воздействия динамики геологической среды на объекты, в качестве порогового (предельного) значения используется величина, связанная с деформационным порогом разрушения конструкционного материала, – ε_n . Это вполне естественно, так как данные об уровне современного геодинамического состояния получают на основе геодезических измерений и исследования распределения вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности и их производных (наклонов и относительных деформаций). Поскольку ε_n – это безразмерная величина, характеризующая относительную деформацию, то она практически не зависит (в случае однородной деформации) от масштаба измерений.

Однако, если оценивать воздействие на объект современных аномальных геодинамических процессов в разломных зонах, то деформационное поле будет контрастно-неоднородным. В этом случае обязательным элементом идентификации (сравнения) наблюдаемых и нормативных величин становится четкое определение величины относительных деформаций в зависимости от типа деформирования (изгиб, сдвиг, деформации сжатия и растяжения и т. д.).

В подавляющем большинстве нормативных документов используются такие параметры деформационного процесса, как относительные деформации сжатия и растяжения, наклоны земной поверхности, радиус кривизны, относительная неравномерность осадок, крен и т. д. Зачастую эти понятия являются синонимами, отражая специфику отраслевой терминологии. Так, например, наклон формально подобен крену, мульда оседания (сдвижения) – прогибу и т. п. В нормативном документе СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» даны определения таких понятий, как осадки, просадки, подъемы и оседания, которые обусловлены совершенно различными экзогенными, техногенными и прочими причинами, но по форме проявления вертикальных смещений земной поверхности все эти типы деформационного процесса сводятся к изгибу (положительному или отрицательному).

Проведение инженерных расчетов, определяющих допустимые уровни деформаций при проектировании и строительстве сооружений, основаны на применении методов механики деформирования твердого тела. В базовых учебных изданиях по механике деформируемых сред [3] даны всего четыре элементарных (простых) типа деформаций: растяжение – сжатие; сдвиг (срез); кручение; изгиб. Поэтому для определения предельных и/или допустимых деформаций используются именно эти элементарные типы деформаций, поскольку они пол-

ностью соответствуют основным схемам экспериментальных испытаний конструкционных материалов.

При использовании результатов повторных геодезических наблюдений не всегда соблюдается основной принцип идентификации: соответствие средств и способов измерений свойствам наблюдаемого объекта. Зачастую сложная пространственно-временная структура деформационных процессов и дефицит сведений о реальных свойствах геологической среды приводят к неоднозначным выводам об уровне геодинамической опасности, например, таких объектов недропользования, как месторождения полезных ископаемых. В этой связи ниже рассмотрены некоторые принципиальные аспекты идентификации результатов повторных геодезических наблюдений, получаемых при проведении геодинамического мониторинга таких объектов.

Относительный характер результатов наблюдений в современной геодинамике

При проведении дискретных (повторных) наблюдений принципиально важный вопрос заключается в установлении оптимальной пространственно-временной детальности измерений. Как правило, большая пространственная детальность наблюдений характерна для относительно локальных наблюдательных сетей и наоборот. Необходимо проводить наблюдения, тщательно соблюдая принцип соответствия между динамическими свойствами объекта и пространственно-временной детальностью измерений, поскольку невозможно редкими пространственно-временными сетями производить измерения локальных, быстропротекающих процессов.

Это напрямую следует из двух соотношений неопределенностей, известных в физике колебаний и волн. Первое связывает неопределенность (погрешность измерения) в определении волнового числа ΔK ($K = 2\pi/\lambda$) и пространственной детальности измерений (густоте наблюдательных пунктов) ΔX : $\Delta K \cdot \Delta X = 1$. Второе обуславливает взаимосвязь между погрешностью определения частоты наблюдаемого процесса $\Delta \omega$ и неопределенностью во временной дискретности наблюдений Δt : $\Delta \omega \cdot \Delta t = 1$. Из первого соотношения следует, что с помощью больших расстояний между пунктами наблюдений нельзя выявить малую длину волны λ (малую по пространственному размеру аномалию деформаций) и наоборот. Второе соотношение утверждает, что быстропротекающие, короткопериодные процессы необходимо наблюдать с повышенной частотой опроса [4].

Из основ теории измерений следует невозможность отождествления абсолютных и относительных характеристик измерений, но хорошо известно, что существующие методы изучения современных геодинамических процессов в основном являются относительными. Пусть на земной поверхности имеются два (А и Б) прочно закрепленных репера, которые ориентированы по азимуту «север – юг» таким образом, что пункт А расположен южнее пункта Б (рис. 1).

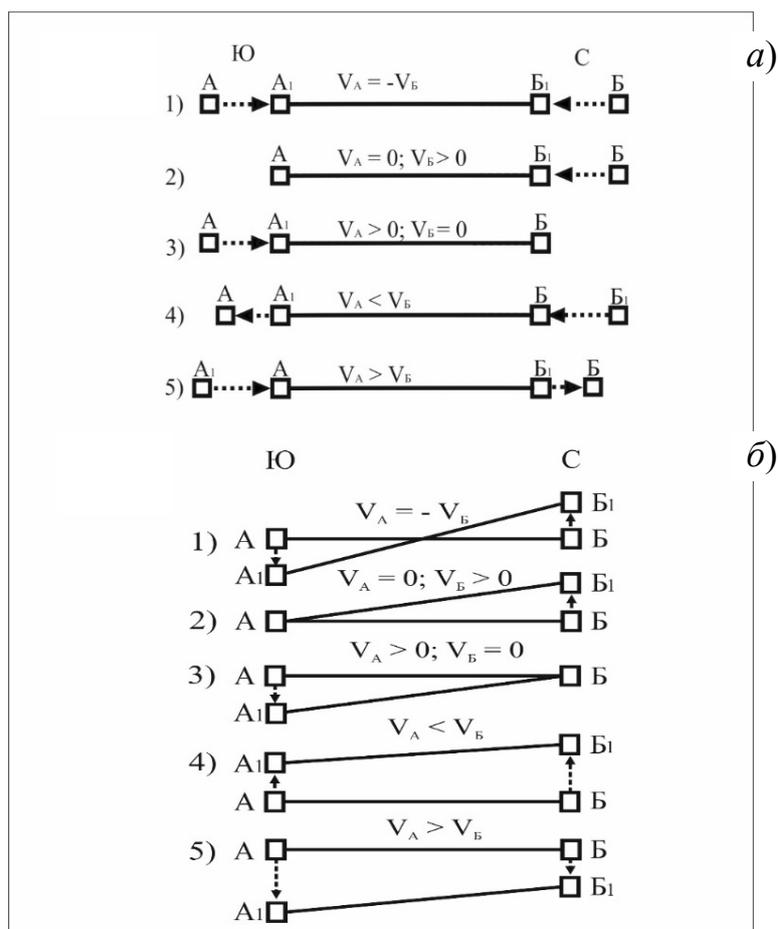


Рис. 1. Относительный характер горизонтальных (а) и вертикальных (б) смещений реперов при абсолютном укорочении и абсолютном наклоне на юг

Можно показать, что абсолютному понятию «укорочение» будет соответствовать пять различных кинематических ситуаций с относительными горизонтальными смещениями поверхности и, следовательно, различными геодинамическими обстановками (рис. 1, а). Аналогично, абсолютному понятию «наклон на юг» будут соответствовать пять различных геодинамических ситуаций с относительными вертикальными смещениями земной поверхности (рис. 1, б).

Это справедливо для систем наблюдений при малом количестве обсерваторий или для коротких профилей с малым количеством наблюдательных пунктов. Когда имеются наблюдения с высоким пространственно-временным разрешением, то существует возможность определить «абсолютное» значение смещения земной поверхности. Например, при локальных просадках земной поверхности можно считать, что амплитуда аномального изменения, отсчитываемая от «нуля», определяемого точностью наблюдений, есть абсолютное вертикальное смещение земной поверхности, имеющее однозначное кинематическое объяснение и геодинамическую идентификацию.

Другим примером неоднозначной идентификации результатов относительных измерений служат данные многократных повторных нивелирных на-

блюдений. Обычно используют два варианта построения графиков изменения превышений реперов по профилю и во времени: «эволюционный» и «пульсационный» [2].

В «эволюционном» варианте изменения вертикальных смещений земной поверхности определяются вычитанием текущих величин превышений от значений, полученных при первом наблюдении. В этом случае прослеживается временная эволюция смещений земной поверхности. В «пульсационном» варианте используются разности между смежными эпохами наблюдений и определяются периоды пульсаций вертикальных движений.

На рис. 2 представлена трансформация результатов повторных, высокоточных нивелирных наблюдений на Камчатском геодинимическом полигоне [5]. Из проведенных 156 циклов наблюдений искусственным путем сформированы данные по 11 циклам, интервал между которыми составляет 3 месяца. Совместный анализ обоих графиков ярко демонстрирует относительный характер смещений. Так, если рассматривать только эволюционный график в эпоху 7-1, то ясно видны два локальных минимума (просадки земной поверхности).

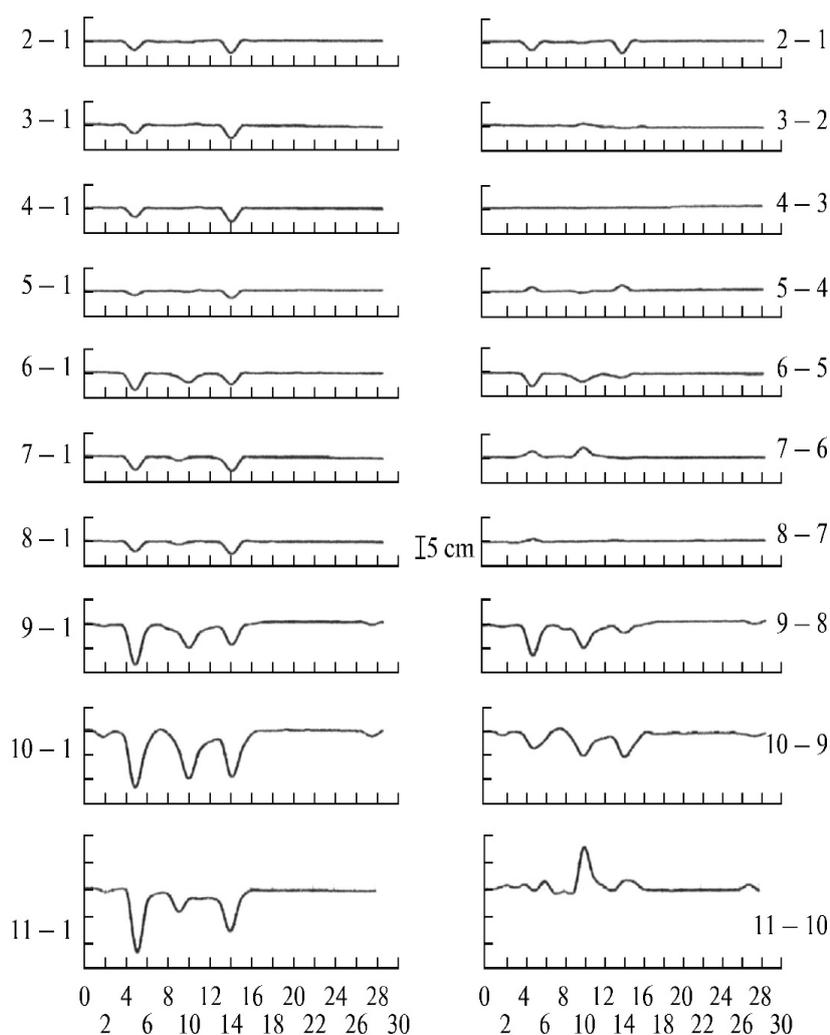


Рис. 2. «Эволюционные» (слева) и «пульсационные» (справа) графики вертикальных смещений земной поверхности

Если же рассматривать только пульсационный график, то в эпоху (7-6), то есть «в то же время», наблюдаются два максимума (поднятия земной поверхности). Отсюда следует вывод, что необходимо тщательно учитывать относительный характер измеряемых величин в современной геодинамике.

Иногда идентификация истинных смещений невозможна в рамках использования одного метода в принципе. Это, например, происходит при идентификации измеренных смещений земной поверхности в методе спутниковой радарной интерферометрии (РСА-интерферометрии). Известно, что данные РСА интерферометрии позволяют определять смещения в направлении видения спутника (LOS) относительно выбранного в качестве точки отсчета радарного изображения. Поэтому определение полного вектора смещений в форме трех естественных составляющих в рамках только РСА интерферометрии (без дополнительных данных) принципиально невозможно, поскольку необходимо при одном известном значении (величины LOS-смещения) определить три неизвестные компоненты полного вектора смещений поверхности. В математике такие методы неизвестны. Необходимо либо комплексировать радарные данные с результатами геодезических измерений, либо использовать априорную информацию о наблюдаемом объекте (процессе) для модельной оценки компонент полного вектора смещений земной поверхности. К сожалению, во многих работах, особенно отечественных исследователей, величина измеренного «наклонного расстояния» LOS определяется как вертикальное смещение земной поверхности, что приводит к принципиально неверной идентификации наблюдаемых геодинамических явлений [6]. Необходимо тщательное соблюдение условий идентификации геодинамических наблюдений, особенно при сопоставительном анализе результатов спутниковых и наземных геодезических наблюдений [7, 8, 9].

Идентификация типов деформаций и их тензоров по результатам геодинамического мониторинга

Результаты мониторинговых измерений должны быть однозначно идентифицированы. Причем это касается не только измеренных смещений земной поверхности, но и их производных, поскольку последние являются компонентами тензора деформации, описывающего наиболее объективные, инвариантные характеристики деформационного процесса. Если необходимо измерить вертикальную компоненту смещения, то вся измерительная процедура от типа сенсора до обработки результатов – должна быть направлена на установление именно вертикальной компоненты полного вектора смещений. Однако возможны ситуации, когда измеренные прямым методом величины допускают неоднозначную трактовку.

Широко известно, что наклон земной поверхности идентифицируется как горизонтальный градиент вертикальных смещений. Это полностью соответствует рассмотренным выше ситуациям с вертикальными перемещениями фикси-

рованных точек земной поверхности (см. рис. 1, б). Но возможна и другая ситуация. Наклон поверхности может быть определен и как вертикальный градиент горизонтальных смещений. Первая ситуация – это наклон, измеряемый горизонтальным наклономером (или нивелированием), который регистрирует изменения наклона горизонтальной поверхности, а вторая – это наклон по вертикали столба, врытого в землю, или вертикальный наклономер (инклинометр), расположенный в достаточно глубокой скважине и фиксирующий наклон ее оси. В первом случае наклон поверхности вызван неравномерным распределением вертикальных смещений по пространству, а во втором – неравномерным распределением горизонтальных смещений по глубине. В работе [10] выявлен эффект влияния горизонтальных деформаций на результаты изучения «вертикальных» смещений земной поверхности маятниковыми наклономерами. Оказалось, что из-за различной степени деформируемости осадочных горных пород и железобетонного пола приборы фиксировали наклоны, обусловленные вертикальным градиентом горизонтальных смещений, что приводило к неадекватной идентификации результатов наклономерных измерений.

Еще одной важной проблемой идентификации напряженно-деформированного состояния в современной геодинамике является определение типа регионального нагружения. В настоящее время не вызывает сомнения, что наблюдаемые деформации земной поверхности, регистрируемые геодезическими методами, происходят в разломно-блоковой среде. Но существует «разломно-блоковая дилемма» при объяснении доминирующего механизма формирования аномальной деформационной активизации разломных зон. Либо активным элементом, создающим современные аномальные деформации, является блок, а разлом выступает в качестве «пассивного» элемента, либо зона разлома сама является источником аномальных движений, а блоки являются пассивными элементами – вмещающей средой.

Для того, чтобы разрешить эту дилемму, необходимо привлечь представления об энергетике деформационных процессов. Как следует из основ физики деформируемых сред с дефектами, процесс нагружения деформируемой среды может быть осуществлен двумя путями: «мягким» и «жестким». В случае «мягкого» нагружения деформационные процессы развиваются в обстановке фиксированных, квазистатических нагрузок. При реализации «жесткой» схемы фиксированными являются смещения (деформации). В опытах с образцами горных пород первая схема соответствует так называемым испытаниям на ползучесть. В рамках «жесткой» схемы реализуется заданная программа фиксированных (монотонных) смещений нагружающих элементов пресса.

Можно показать, что накопление энергии и концентрация напряженно-деформированного состояния в случае «мягкой» схемы нагружения происходит в пределах «мягких» включений – областей пониженных жесткостных параметров среды. В случае «жесткой» схемы накопление энергии происходит в пределах «жестких» включений – областей повышенной жесткости среды [11].

Обобщение работ по изучению деформаций земной поверхности, проведенных методами спутниковой и наземной геодезии в различных регионах и пространственно-временных масштабах, показало, что скорости среднегодовых относительных деформаций лежат в диапазоне 10^{-8} – 10^{-9} в год и слабо зависят от базы и продолжительности периода наблюдений [7, 11]. Если полагать, что скорость деформаций линейно пропорциональна скорости приложенных напряжений, то при типичных значениях жесткости среды вариации во времени региональных напряжений будут составлять величины порядка 10–100 Па в год или 0,1–1 мбар (0,1–1 атм) в год. Это удивительный результат, если учесть, что оценки скоростей деформаций получены по результатам геодезических наблюдений в сейсмоактивных регионах.

Таким образом, в случае таких малых скоростей регионального деформирования реализуется «мягкая» схема регионального нагружения и аномальное напряженно-деформированное состояние формируется в пределах «мягких» включений, т. е. в зонах разломов различного типа и порядка. Иными словами, при прочих равных условиях, современные аномальные деформации земной поверхности обусловлены активностью самих разломных зон.

Другим примером неадекватной идентификации результатов измерений в современной геодинамике является воздействие одноосного девиаторного напряжения во времени, которое может приводить к вариациям силы тяжести. В работах [2, 12] показано, что в пределах Припятского палеорифта доминирует практически одноосное субгоризонтальное растяжение, которое ортогонально осевой части этой структуры. В этих работах представлены результаты сопоставления повторных нивелирных, светодальномерных и гравиметрических наблюдений в зоне Речицкого разлома, когда возникновение локальных просадок земной поверхности на разломе сопровождалось одноосным горизонтальным растяжением и неприливыми вариациями силы тяжести. Все аномальные изменения были метрологически значимы и получены по густой сети наблюдательных пунктов вдоль профиля, пересекающего разлом. При этом в результатах гравиметрических наблюдений были учтены поправка за свободный воздух, эффект Фоглера и влияние динамики грунтовых вод.

Если обратиться к известному учебнику по геодинамике [13], то становится очевидным, что данное напряженное состояние является девиатором и, следовательно, деформация формоизменения является сдвиговой. Действительно, если использовать терминологию этого учебника (цитаты взяты в кавычки), то горизонтальное нормальное напряжение состоит из «тектонической добавки» $\Delta\sigma_{xx}$ и литостатического (гидростатического) давления $\rho g y$. Тогда «тектоническая добавка» является девиаторным напряжением»: $\Delta\sigma_{xx} = \sigma_{xx} - \rho g y$. Таким образом, получается парадоксальный вывод. Изменение во времени девиаторного напряжения приводит к вариациям гравитационного поля, а значит и к изменению объема.

Курьезность этого вопроса заключается в том, что в механике деформируемых сред [14] считается, что девиаторы напряжений и деформаций не вызывают изменение объема деформируемого тела и, соответственно, не приводят

к возникновению аномалеобразующей вариации плотности, вызывающей флуктуации гравитационного поля во времени. Утверждается, что, тензоры-девиаторы описывают только явление формоизменения, которое строго отождествляется со сдвиговой деформацией.

Однако при одноосном растяжении упругого тела кубической формы произойдет изменение формы куба. Он станет параллелепипедом. Но одновременно произойдет и увеличение первоначального объема. Очевидно, что формоизменение сопровождается изменением объема и не обязательно определяет только сдвиговую деформацию.

Кажущаяся курьезность ситуации снимается, если учитывать, что выделение из тензоров напряжений и деформаций частей, соответствующих всестороннему растяжению или сжатию, не означает полного выделения всех компонент, относящихся к объемным эффектам. В тензорах-девиаторах деформаций наряду с компонентами сдвиговых деформаций содержатся диагональные компоненты, которые непосредственно связаны с линейными деформациями. Поэтому девиаторы в целом описывают не только эффекты сдвига, а деформация формоизменения не является однозначным отражением сдвиговых деформаций [6].

Следовательно, необходима тщательная идентификация типа измеряемых деформаций и их производных, выражаемых соответствующими компонентами тензора деформаций. Детальная идентификация типов напряженно-деформированного состояния особенно актуальна при тектонофизической интерпретации результатов измерений в современной геодинамике. Так, известный отечественный исследователь современных движений земной коры методами геометрической теории деформаций Н. П. Есиков [15] в основу своих исследований положил принцип разложения «тензора чистой деформации на изотропную и девиаторную части». Он также полагал, что «Девиаторная часть – чисто сдвиговая деформация без изменения объема...». Выше было показано, что это не всегда так. Подход Н. П. Есикова к анализу результатов повторных геодезических наблюдений был продолжен в работах его последователей. Так, в ряде интересных и обстоятельных публикаций А. Н. Соловицкого и других авторов [16–18] используется блоковая модель движения земной поверхности, а компоненты тензора деформаций вычисляются методом наименьших квадратов без учета особенностей режима регионального нагружения и специфики компонент тензора сдвиговой деформации. В этой связи может оказаться, что надежно выявленные аномалии вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности не обусловлены движениями блоков как гомогенных тел, а вызваны локальными деформационными процессами внутри разломных зон.

Оценка относительных деформации изгиба земной поверхности в зонах разломов

Результаты исследований современных геодинамических процессов, проведенных в различных регионах Земли, показали, что наиболее интенсивной (экстремальной) формой их проявления являются деформации земной поверх-

ности природного и/или техногенного происхождения, сосредоточенные в окрестности разломных зон [2, 4, 19–23].

Кинематический тип аномальных движений в зонах разломов представлен сдвигами вертикальной и горизонтальной ориентации и изгибами (региональными и локальными). Надежно установлено, что современные вертикальные движения земной поверхности в зонах разломов, полученные по результатам многократных повторных наблюдений, превосходят горизонтальные. Этот факт имеет естественное физическое объяснение, поскольку горизонтальные смещения происходят в стесненных условиях. Вертикальные смещения происходят на свободной от напряжений земной поверхности, что существенно усиливает их амплитуду.

В результате анализа большого массива данных были выявлены интенсивные локальные аномалии современных вертикальных движений земной поверхности, приуроченные к зонам разломов. Эти аномальные движения высокоамплитудны (50–70 мм/год), короткопериодичны (0,1–1 год), пространственно локализованы (0,1–1 км), обладают пульсационной и знакопеременной направленностью. Среднегодовые скорости относительных деформаций у них крайне высоки ($2-7 \cdot 10^{-5}$ /год) и поэтому их определяют как суперинтенсивные деформации (СД) земной поверхности в зонах разломов [2]. Учитывая, что столь высокая скорость относительных деформаций способна за период эксплуатации объектов обеспечить накопление предельно допустимого уровня, такие разломы получили название опасных [21]. Морфолого-генетический анализ и геомеханическая интерпретация выявленных аномалий вертикальных смещений земной поверхности [2, 12, 22] позволила отнести их приуроченность к разломным зонам раздвигового типа.

Согласно классификации элементарных типов деформаций СД-аномалии представляют собой локальные изгибы земной поверхности в окрестности разломной зоны. Для того, чтобы оценивать геодинамическую опасность объектов, расположенных в разломной зоне, необходимо сравнить относительные деформации изгиба с допустимыми и предельными величинами, регламентированными в нормативных документах. Однако в существующих теориях изгиба стержней, пластин и оболочек отсутствуют формулы для расчета относительных деформаций. Как правило, даются выражения, связывающие максимальную амплитуду изгиба или относительные горизонтальные деформации сжатия и растяжения с приложенными силами или моментами в зависимости от типа изгиба (продольный или поперечный). Формулы для оценки относительной деформации изгиба, которая бы связывала амплитуду изгиба с его горизонтальным размером, в этих теориях отсутствуют [14].

Единственный нормативный документ, который удалось обнаружить автору статьи, где рассматривается количественная оценка относительных деформаций изгиба, – это СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*). В нем без вывода приведена формула расчета относительной деформации «прогиба» и «выгиба», которые

следует определять по результатам наблюдений. Формула относительного прогиба имеет следующий вид (в обозначениях этого документа):

$$\frac{f}{L} = \frac{2 \cdot s_2 - s_1 - s_3}{2L}, \quad (1)$$

где f – стрела прогиба (амплитуда s_2); s_1, s_2, s_3 – амплитуды вертикальных смещений левой, центральной и правой точек прогиба, соответственно; L – расстояние между крайними точками прогиба (ширина прогиба). Аналог этой формулы (тоже без вывода) можно найти в [24]. Формулу (1) можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{f}{L} = \frac{(s_2 - s_1) - (s_3 - s_2)}{2 \cdot L}. \quad (2)$$

Если ввести привычные для геодезии обозначения для вертикальных смещений, то формулу (2) для оценки относительного прогиба (изгиба) можно записать в следующем виде:

$$\frac{f}{L} = \frac{(\Delta h_1 - \Delta h_2)}{2 \cdot L}. \quad (3)$$

В случае симметричного прогиба (изгиба) формула (3) приобретает следующий вид:

$$\frac{f}{L} = \frac{\Delta h}{L}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует принципиально важный вывод. Традиционно относительную деформацию оценивают делением амплитуды аномального вертикального смещения земной поверхности на ширину аномалии, т. е. определяется горизонтальный градиент вертикальных смещений $\frac{\Delta h}{L}$. В этом случае нет никакой разницы в численном выражении между однородным наклоном, вертикальным сдвигом по разлому и локальным изгибом земной поверхности в его окрестности.

В этой связи ниже приведен дидактически подробный вывод формулы для расчета относительных деформаций изгиба поверхности в зонах раздвиговых разломов и показана ее связь с параметрами кривизны и радиуса кривизны земной поверхности. Для вывода формулы используется тот факт, что наблюдаемыми величинами, в данном случае, являются амплитуда изгиба и его ширина. При этом имеется в виду, что для измерения локального изгиба достаточно наличия трех реперов, когда средний репер испытывает максимальное вертикальное смещение, а расстояние между двумя крайними равно ширине изгиба.

Пусть на земной поверхности активизируется раздвиговой разлом, сопровождаемый симметричным изгибом вниз с амплитудой h , который измерен путем нивелирования по трем реперам № 1, 2 и 3 (см. рис. 1). Расстояние между крайними реперами равно: $l_1 + l_2 = L$.

Этот случай соответствует типичному проявлению СД-аномалий вертикальных движений типа γ , который в подавляющем большинстве случаев морфологически выражен как квазисимметричный пикообразный изгиб земной поверхности вниз.

Условие симметричности позволяет представить геометрическую форму этого изгиба в виде равнобедренного треугольника ABC , в котором высота равна h (рис. 3). В этом случае расстояние между смежными реперами будет равно:

$$x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = l_1 = l_2 = h. \quad (5)$$

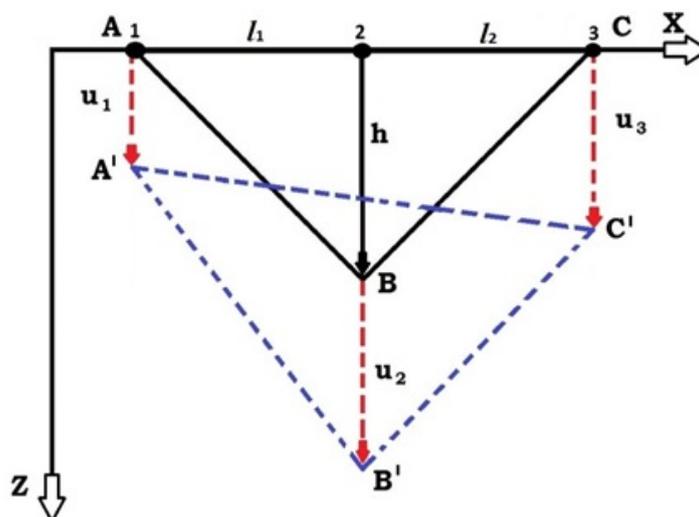


Рис. 3. Геометрическое представление формирования деформации изгиба

Координаты вершин этого треугольника A , B и C будут следующими:

$$A \cdot (x_2 - l, z_1); B \cdot (x_2, z_2 - h); C \cdot (x_2 + l). \quad (6)$$

Если в случае вертикальных движений каждая вершина треугольника изменится на величины u_1 , u_2 , u_3 , то можно рассчитать относительную деформацию, обусловленную этими смещениями. Пусть S_1 – площадь треугольника ABC в начальный момент времени, а S_2 – площадь деформированного треугольника $A'B'C'$. Тогда относительные изменения площади, которая в геометрической теории деформаций [3] именуется дилатацией θ , будут записаны как

$$\theta = \frac{S_2 - S_1}{S_1}. \quad (7)$$

Площадь начального треугольника S_1 , как следует из основ аналитической геометрии, будет иметь следующее выражение:

$$S_1 = \frac{1}{2} \cdot [z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2)], \quad (8)$$

где x_1, x_2, x_3 и z_1, z_2, z_3 – координаты вершин треугольника ABC в направлении координатных осей x и z , соответственно.

Площадь треугольника $A'B'C'$ – S_2 после деформации будет равна

$$S_2 = \frac{1}{2} \cdot [(z_1 + u_1)(x_2 - x_3) + (z_2 + u_2)(x_3 - x_1) + (z_3 + u_3)(x_1 - x_2)]. \quad (9)$$

Используя формулу (7), можно записать выражение для θ

$$\theta = \frac{S_2 - S_1}{S_1} = \frac{u_1 \cdot (x_3 - x_2) + u_2 \cdot (x_1 - x_3) + u_3 \cdot (x_2 - x_1)}{z_1 \cdot (x_3 - x_2) + z_2 \cdot (x_1 - x_3) + z_3 \cdot (x_2 - x_1)}. \quad (10)$$

Возвращаясь к рис. 3, можно выразить слагаемые в формуле (10), используя (5) и (6). В этом случае формула для определения θ будет равна

$$\theta = \frac{(u_1 - u_2) + (u_3 - u_2)}{-2h}. \quad (11)$$

Используя обычную схему нивелирования, можно переписать формулу (11) следующим образом:

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{(u_2 - u_1) - (u_3 - u_2)}{h}. \quad (12)$$

Чтобы ввести в формулу (12) расстояния между реперами $(x_2 - x_1)$ и $(x_3 - x_2)$, можно записать следующие очевидные соотношения. Учитывая, что $(x_2 - x_1) = (x_3 - x_2) = h = l_1 = l_2$, то $(u_2 - u_1) = \frac{(u_2 - u_1) \cdot h}{x_2 - x_1}$; $(u_3 - u_2) = \frac{(u_3 - u_2) \cdot h}{x_3 - x_2}$.

Подставляя эти соотношения в (12), окончательно получаем:

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} - \frac{u_3 - u_2}{x_3 - x_2} \right). \quad (13)$$

Из полученной формулы следует однозначная физическая трактовка изгиба поверхности. Как известно из механики деформируемых сред [3], напряженно-деформированное состояние можно характеризовать силовым (теория напряжений), геометрическим (теория деформаций) и реологическим (связь на-

пряжений и деформаций для различных типов сред) образом. Результаты геодезических наблюдений за смещениями закрепленных точек на земной поверхности и оснований зданий и сооружений естественным образом описываются с помощью геометрической теории деформаций, которая не связана с реологическими свойствами среды (упругими, пластическими, вязкими и т. п.). С этих позиций изгиб – это совокупность двух противоположно направленных наклонов поверхности, что и подчеркивается знаком «минус» в формуле (9).

Следует отметить, что в [15] методом конечных элементов была получена формула для плоской дилатации, аналогичная по структуре формуле (13). Однако в этой работе изгиб поверхности рассматривался как абстрактный геометрический объект кусочно-линейной аппроксимации тензорного поля смещений. Образ треугольника – это симплекс в двухмерном евклидовом пространстве. Поэтому изменение его площади (плоская дилатация) не отражает реальную геомеханическую (тектонифизическую) ситуацию при описании поля смещений земной поверхности, особенно в разломных зонах.

Если теперь ввести привычные для геодезии обозначения для превышений: $u_2 - u_1 = \Delta h_1$ – превышение между двумя реперами в первой секции; $u_3 - u_2 = \Delta h_2$ – превышение между двумя реперами во второй секции, то формула (13) примет окончательный вид

$$\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h_1}{l_1} - \frac{\Delta h_2}{l_2} \right). \quad (14)$$

Формула (14) позволяет вычислять относительную деформацию изгиба и в случае асимметричной кривой, так как длины секций l_1 и l_2 не равны друг другу в общем случае. Если же изгиб имеет симметричную форму, то $\Delta h_2 = -\Delta h_1 = \Delta h$. Тогда формула для оценки относительной деформации симметричного изгиба будет следующей:

$$\theta = \frac{2\Delta h}{L}. \quad (15)$$

Сравнение формулы (14) с формулой (4) показывает, что оценка по формуле, предложенной в нормативном документе, в 2 раза занижает значение относительной деформации прогиба (изгиба). Ошибка заключается в том, что в формуле (1) не учитывают изначально, что расстояния между реперами не обязательно должны быть равными. Используется среднее значение двух разностей осадок по всей ширине прогиба, что и приводит к появлению двойки в знаменателе формулы (1). Естественно, что подобная погрешность существенно снижает объективную идентификацию геодинамической опасности в случае локальных изгибов земной поверхности в разломных зонах.

В ряде нормативных документов используется понятие кривизны и радиуса кривизны земной поверхности. Как показано в известном учебном пособии для горных инженеров-маркшейдеров [25], средняя кривизна земной поверхно-

сти на границе интервалов между реперами 1-2 и 2-3 описывается следующей формулой:

$$K_{1-2-3} = \frac{i_{2-3} - i_{1-2}}{\frac{1}{2}(l_{1-2} + l_{2-3})}, \quad (16)$$

где i_{1-2} ; i_{2-3} – наклоны земной поверхности между реперами 1-2 и 2-3; l_{1-2} ; l_{2-3} – расстояние между реперами 1-2 и 2-3.

Для связи относительной деформации изгиба и кривизны поверхности можно рассмотреть случай симметричного изгиба (кривизны). Тогда формула (16) преобразуется следующим образом:

$$K_{1-2-3} = \frac{4i}{L}, \quad (17)$$

где $i = i_{2-3} = \frac{\Delta h_1}{l_1} = -i_{1-2} = -\frac{\Delta h_2}{l_2}$, поскольку наклоны имеют противоположные знаки при изгибе; L – ширина участка поверхности, испытывающего кривизну.

Если использовать обозначения, введенные выше, то формула для относительного изгиба (10) будет следующей:

$$\theta = 2i. \quad (18)$$

При подстановке (17) в (16) получается формула связи кривизны поверхности с ее изгибом

$$K_{1-2-3} = \frac{2\theta}{L}. \quad (19)$$

Соответственно, радиус кривизны R определяется следующим образом:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{L}{2\theta}. \quad (20)$$

Оценка геодинамической опасности объектов в зонах проявления деформации изгиба

Как отмечалось выше, основным критерием, определяющим геодинамическую опасность объектов, является соизмеримость или превышение наблюдаемых значений относительных деформаций земной поверхности предельных значений деформаций, регламентированных нормативными документами. Принципиально важно отметить, что в нормативных документах оба типа вертикальной составляющей деформаций земной поверхности, которая воздействует на объекты, наклон (крен) и изгиб (прогиб, оседание), с точки зрения нормативных документов относятся к относительной разности осадок. Различие

возникает при использовании предельных и допустимых значений для конкретных типов сооружений.

Так, например, согласно СП 22. 13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*) относительная разность осадок конкретизируется предельными величинами прогиба и выгиба (положительного или отрицательного изгиба) и равна, например, для многоэтажных бескаркасных зданий с несущими стенами: а) из крупных панелей – 0,0008; б) крупных блоков или кирпичной кладки без армирования – 0,001; в) то же, с армированием, в том числе с устройством железобетонных поясов или монолитных перекрытий, а также зданий монолитной конструкции – 0,001 2.

В [2, 21, 26] предложено оценивать геодинамическую безопасность сооружений, основываясь на естественном условии, что накопленные за период эксплуатации объекта деформации изгиба (например, в зонах активных разломов) должны быть меньше предельных значений. Это условие может быть сформулировано в виде следующего неравенства:

$$\dot{\theta} < \frac{\varepsilon_n}{T}, \quad (21)$$

где $\dot{\theta}$ – среднегодовая скорость изгиба; ε_n – предельная деформация изгиба, регламентированная нормативными документами; T – длительность эксплуатации объекта.

Из формулы (21) можно определить те значения скорости деформаций, которые соответствуют приведенным выше нормативным документам. Если оперировать типичными значениями предельных изгибов на уровне 0,001, длительностью эксплуатации объектов в 50 лет, то окажется, что относительные среднегодовые скорости деформаций изгиба должны иметь значения, не превышающие $2-3 \cdot 10^{-5}$ в год. Если же учесть, что аномалии деформаций носят пульсационный характер, то необходимо использовать не представления о монотонном накоплении деформаций, а скорости, накопленные только в период существования аномалий. В этом случае в формуле (21) появляется коэффициент C , который учитывает пульсационный характер протекания аномальных деформаций. В этом случае формула (22) будет иметь следующий вид:

$$\dot{\theta} < \frac{C \cdot \varepsilon_n}{T}, \quad (22)$$

где C – эмпирический коэффициент, который по результатам многочисленных, длительных, повторных геодезических наблюдений колеблется в диапазоне 3-5. В таком случае, предельные среднегодовые скорости относительных деформаций изгиба не должны превышать значения порядка $5 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-4} в год.

Как отмечено выше, в зонах разломов среднегодовые скорости относительных деформаций достигают величин $(5-7) \cdot 10^{-5}$ в год, что переводит эти разломы из категории «активных» в категорию «опасных».

В качестве примера на рис. 4 представлены результаты повторных нивелирных наблюдений на геодинамическом полигоне, организованном в пределах Ромашкинского месторождения нефти.



Рис. 4. Пример проявления аномальных, локальных деформаций изгиба, выявленных по результатам повторного нивелирования на Ромашкинском нефтяном месторождении. В нижней части показаны аварийные скважины, на которых отмечены необратимые искривления стволов

Из рисунка видно, что в местах проявления локальных изгибов земной поверхности (СД-деформации) в зонах разломов со среднегодовыми скоростями относительных деформаций порядка $6 \cdot 10^{-5}$ в год зафиксированы необратимые искривления стволов скважин, что свидетельствует в пользу справедливости оценки геодинамической опасности по формуле (21). Именно этот подход был положен в основу создания «Карты геодинамической опасности недр Юго-Востока Татарстана» [23].

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Рассмотрены проблемные вопросы идентификации результатов повторных геодезических (наземных и спутниковых) наблюдений и показана необходимость тщательного учета относительного характера измеряемых смещений, адекватной оценки компонент тензора деформаций, вида и уровня регионального нагружения в условиях разломно-блоковой дилеммы формирования аномальной активности геологической среды.

2. Получены формулы для оценки связи относительных деформаций изгиба с типовыми в маркшейдерии и инженерной геодезии формулами для расчета кривизны и радиуса кривизны.

3. Обнаружено, что формула для расчета относительного прогиба (выгиба), которая приведена в ряде нормативных документов, ошибочна и занижает истинные значения в два раза.

4. Изложена методика оценки геодинамической опасности объектов, расположенных в зонах активных разломов, характеризующихся аномально высокими скоростями относительных деформаций изгиба, и приведен пример ее реализации для объектов обустройства Ромашкинского нефтяного месторождения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей – М. : Наука, 1991. – 432 с.
2. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. – М. : Агентство Экономических Новостей, 1999. – 220 с.
3. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие для вузов. – М. : Наука, 1979. – 743 с.
4. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 401–443.
5. Churikov V. A., Kuzmin Yu. O. Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia // Geophysical Journal International. – 1998. – Vol. 133. – P. 607–614.
6. Кузьмин Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51–64.
7. Кузьмин Ю. О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // Физика Земли. – 2017. – № 6. – С. 24–39.

8. Кузьмин Ю. О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 98–107.
9. Кузьмин Ю. О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 44–60.
10. Курбанов М. К., Кузьмин Ю. О. О деформографическом эффекте по наклонным данным // Физика Земли. – 1982. – № 9. – С. 76–78.
11. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. – 2013. – № 5. – С. 28–46.
12. Сидоров В. А., Кузьмин Ю. О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. – М. : Наука. 1989. – 189 с.
13. Turcotte D. L., Shubert G. Geodynamics. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2002.
14. Timoshenko S., Goodier J. N. Theory of Elasticity. – New York : McGraw – Hill, 1970.
15. Есиков Н. П. Современные движения земной поверхности с позиции теории деформаций. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 226 с.
16. Карпик А. П., Каленицкий А. И., Соловицкий А. Н. Технология изучения изменений во времени деформаций блоков земной коры при освоении месторождений Кузбасса // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 3–11.
17. Соловицкий А. Н. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений: геодезические построения // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 81–89.
18. Соловицкий А. Н. Теория высот при изучении геодинамики земной коры // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 34–42.
19. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 1. – С. 33–41.
20. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 25–30.
21. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 87–101.
22. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. – 2018. – № 6. – С. 87–105.
23. Хисамов Р. С., Гатиятуллин Н. С., Кузьмин Ю. О. и др. Современная геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана / под ред. Р. С. Хисамова и Ю. О. Кузьмина. – Казань : Фэн, 2012. – 240 с.
24. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Современная кинематика земной поверхности юга Сибири. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 153 с.
25. Орлов Г. В. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки : учеб. пособие для студентов специальности «Маркшейдерское дело». – М. : Горная книга, Изд-во МГГУ, 2010. – 198 с.
26. Кузьмин Ю. О. Геодинамический риск объектов нефтегазового комплекса // Российская Газовая Энциклопедия. – М. : Большая Российская Энциклопедия, 2004. – С. 121–124.

Получено 29.10.2018

© Ю. О. Кузьмин, 2018

IDENTIFICATION OF RESULTS OF REPEATED GEODESIC OBSERVATIONS AT THE ESTIMATION OF THE GEODYNAMIC HAZARD OF SUBSURFACE OBJECTS

Yuriy O. Kuzmin

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10-1, Bolshaya Gruzinskaya St., Moscow, 123242, Russia, D. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Recent and applied geodynamics, phone: (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

The issues of identification of the results of repeated geodetic observations are considered. It is shown that the lack of an adequate definition of the type, nature and type of regional loading of the fault-block geological environment, as well as the lack of consideration of the relative nature of the measured displacements, leads to incorrect geodynamic interpretation of the results of repeated geodetic observations. In particular, information is given on the study of deformations of the Earth's surface, carried out by satellite and ground-based geodesy in various regions and spatial-temporal scales, which shows that the rates of average annual relative deformations lie in the range of 10^{-8} – 10^{-9} per year and weakly depend on base and duration of the observation period. Assuming that the strain rate is linearly proportional to the velocity of the applied stresses, then at typical values of medium stiffness, the rate of change of regional stresses will be about 10-100 Pa per year or 0.1-1 mbar (0.1-1 atm) per year. This means a "soft" regime of regional loading. Formulas for the relationship between the values of relative bending deformations, the curvature of the earth's surface and the radius of this curvature are derived. A variant is presented for assessing the geodynamic hazard of subsurface facilities located near active fault zones. This approach is demonstrated by the example of analyzing the results of repeated leveling observations at a geodynamic test site organized within the Romashkinskoye oil field.

Key words: repeated geodetic observations, geodynamic hazard, deformation tensor, local bending, identification of observational results, dangerous fault.

REFERENCES

1. Ljung, L. (1986). *Identifikaciya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelej [System Identification: Theory for User]*. University of Linkoping Sweden.
2. Kuzmin, Yu. O. (1999). *Sovremennaja geodinamika i ocenka geodinamicheskogo riska pri nedropol'zovanii [Recent geodynamics and evaluation of geodynamic risk at use of subsoil resources]*. Moscow: Agentstvo jekonomicheskikh novostej, 220 p. [in Russian].
3. Rabotnov, Ju. N. (1973). *Mehanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of a deformable solid]*. Moscow: Nauka Publ., 743 p. [in Russian].
4. Kuzmin, Yu. O. (2014). Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2), 401–443 [in Russian].
5. Churikov, V. A., & Kuzmin, Yu. O. (1998). Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia. *Geophysical Journal International*, 133, 607–614.
6. Kuzmin, Yu. O. (2014). The topical problems of identifying the results of the observations in recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(5), 641–654.
7. Kuzmin, Yu. O. (2017). Paradoxes of the comparative analysis of ground-based and satellite geodetic measurements in recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53(6), 825–839.
8. Kuzmin, Yu. O. (2008). Problematic issues of studying the deformation processes in recent geodynamics. *Gornij informacij-analyticheskij bulletin [Mountain Information and Analytical Bulletin]*, 3, 98–107 [in Russian].

9. Kuzmin, Yu. O. (2009). Tectonophysics and recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 45(11), 973–986.
10. Kurbanov, M. K., & Kuzmin, Yu. O. (1982). About deformographic effect with reference to inclination measurements. *Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth]*, 9, 67–71 [in Russian].
11. Kuzmin, Yu. O. (2013). Recent geodynamics of a faults and paradoxes of the rates of deformation. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 49(5), 626–642.
12. Sidorov, V. A., & Kuzmin, Yu. O. (1989). *Sovremennye dvizhenija zemnoj kory osadochnyh bassejnov [Recent crustal movements in sedimentary basins]*. Moscow: Mezhdudovomstvennyj geofizicheskij komitet SSSR, 189 p. [in Russian].
13. Turcotte, D. L., & Shubert, G. (2002). *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
14. Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*. New York: McGraw–Hill.
15. Esikov, N. P. (1991). *Sovremennye dvizhenija zemnoj poverhnosti s pozicii teorii deformacij [Modern movements of the earth's surface from the position of the theory of deformations]*. Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 226 p. [in Russian].
16. Karpik, A. P., Kalenitskiy, A. I., & Solovitskiy, A. N. (2013). The technology of studying the changes of the deformations of the earth crust blocks in time during the development of deposits of Kuzbass. *Vestnik SGGa [Vestnik SSGA]*, 4(24), 3–11 [in Russian].
17. Solovitskiy, A. N. (2017). Geodesic monitoring of the stress-strain state of the earth's crust in the areas of development of coal deposits: geodetic structures. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 81–89 [in Russian].
18. Solovitskiy, A. N. (2018). Theory of heights in the study of the geodynamics of the earth's crust. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(2), 34–42 [in Russian].
19. Kuzmin, Yu. O. (2007). Recent geodynamics of faults and environmental and industrial safety of oil and gas facilities. *Geologija, geofizika i razrabotka nefijanyh i gazovyh mestorozhdenij [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields]*, 1, 33–41 [in Russian].
20. Kuzmin, Yu. O. (2015). Recent geodynamics of a fault system. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 51(4), 480–485.
21. Kuzmin Yu. O. (2016). Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52(5), 709–722.
22. Kuzmin, Yu. O. (2018), Recent geodynamics of tensile faults, *Izvestiya. Phys. Solid Earth*, 54(6), pp. 886–903.
23. Khisamov, R. S., Gatiyatullin, N. S., Kuzmin, Yu. O., et al. (2012). *Sovremennaja geodinamika i sejsmichnost' Jugo-Vostoka Tatarstana [Recent Geodynamics and Seismicity of the Southeastern Tatarstan]*. R. S. Khisamov & Yu. O Kuzmin (Eds.). Kazan: Fen Publ., 240 p. [in Russian].
24. Kolmogorov, V. G., & Kolmogorova, P. P. (1990). *Sovremennaja kinematika zemnoj poverhnosti juga Sibiri [Recent kinematics of the earth's surface of the south of Siberia]*. Novosibirsk: Nauka Publ. Siberian Branch, 153 p. [in Russian].
25. Orlov, G. V. (2010). *Sdvizhenie gornyh porod i zemnoj poverhnosti pod vlijaniem podzemnoj razrabotki. [Displacement of rocks and the earth's surface under the influence of underground mining]*. Moscow: Gornaja Kniga Publ., MGGU Publ., 188 p. [in Russian].
26. Kuzmin Yu. O. (2004). Geodynamic risk. In *Rossijskaja Gazovaja Jenciklopedija [Russia's Gas Encyclopedia]* (pp. 121–124). Moscow: Bol'shaya Rossijskaya EHnciklopediya [in Russian].

Received 29.10.2018

© Yu. O. Kuzmin, 2018

УДК 551.24:528.481

АНАЛИЗ ПОВТОРНЫХ НИВЕЛИРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ДЕФОРМАЦИЙ

Юрий Олегович Кузьмин

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Россия, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1, доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделением разведочной геофизики и прикладной геодинамики, тел. (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Евгений Альбертович Фаттахов

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Россия, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1, младший научный сотрудник, тел. (499)254-65-65, e-mail: Fea@ifz.ru

В связи с необходимостью тектонофизической интерпретации аномальных вертикальных смещений земной поверхности в зонах активных разломов предложен формализованный подход для селекции типов подвижек. Приведена классификация аномальных, вертикальных смещений земной поверхности в зонах разломов. Показано, что все аномальные изменения сводятся к трем основным типам деформаций: региональный изгиб, локальный изгиб и вертикальный сдвиг. На основе геометрической теории деформаций используются безразмерные параметры, позволяющие выявлять доминирование базовых геомеханических механизмов (вертикальный сдвиг, знакопеременный изгиб) во времени. На ряде геодинамических полигонов (сейсмопрогностических и техногенных) показана реализация введенного параметра F , являющегося пространственным фильтром, который выявляет доминирующую роль конкретного типа аномальной активизации. Представлены материалы повторных нивелирных наблюдений вдоль профилей, пересекающих несколько разломных зон. Выявлены периоды смены локального механизма деформационной активности разломов во времени. Разработана методика, которая позволяет проводить скользящее осреднение сдвиговых и изгибовых подвижек вдоль нивелирных линий, пересекающих несколько разломных зон, и установление доминирующего типа аномалий за весь период наблюдений для каждого разлома.

Ключевые слова: современная геодинамика, геодинамический мониторинг, геодезия, нивелирование, вертикальные движения, разломные зоны, деформационные процессы в зонах разломов, наблюдения.

Как известно, основу информации о пространственно-временной структуре современного геодинамического состояния среды составляют повторные геодезические (наземные и спутниковые) измерения, проводимые на различных масштабных уровнях описания процессов: глобальном, региональном, зональном и локальном.

Исследования глобальных и региональных геодинамических процессов проводятся в основном методами спутниковой геодезии (ГНСС, ГЛОНАСС/GPS) в рамках изучения кинематики литосферных плит. Однако для описания тонкой структуры процессов в зонах разломов необходимо рассмотреть основные пространственно-временные характеристики движений в зональном и локальном масштабах наблюдений. В настоящее время наиболее полная информация по-

лучена по данным повторных нивелирований (вертикальная компонента движений). Это обусловлено целым рядом причин. Нивелирные измерения более технологичны (по сравнению с наземными методами регистрации горизонтальных движений) и выполнены с гораздо большей точностью. Методы спутниковой геодезии в основном используют сети с большими (десятки и сотни километров) расстояниями между пунктами измерений. С другой стороны, при прочих равных условиях, вертикальная составляющая аномальных смещений земной поверхности (свободной от напряжений) значительно превышает горизонтальную компоненту. В этой связи далее рассматриваются преимущественно результаты нивелирных наблюдений, которые получены на специально организованных геодинамических полигонах различного целевого назначения [1–3].

В приведенных публикациях по исследованию пространственно-временной структуры современных деформационных процессов в зонах разломов изложены следующие эмпирические обобщения:

– существуют устойчивые типы локальных аномалий в вертикальных движениях земной поверхности в зонах разломов (таблица). При этом горизонтальные размеры (L) γ -аномалий составляют 0,1–2 км, S -аномалий – 5–10 км, а β -аномалий – 10–30 км. Соотношения между амплитудой (Δh) и протяженностью (L) для каждого типа аномалий связаны через масштабный коэффициент $m = 10^{-6}$ (если амплитуда выражена в миллиметрах, то ширина аномалии – в километрах);

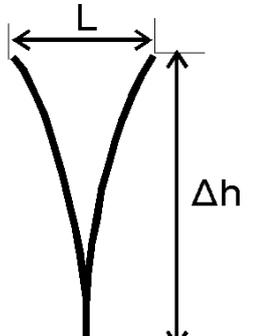
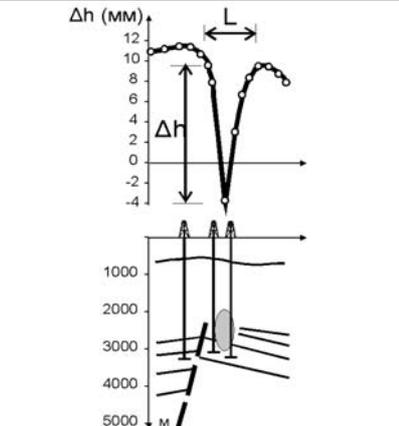
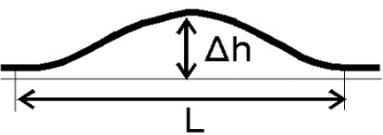
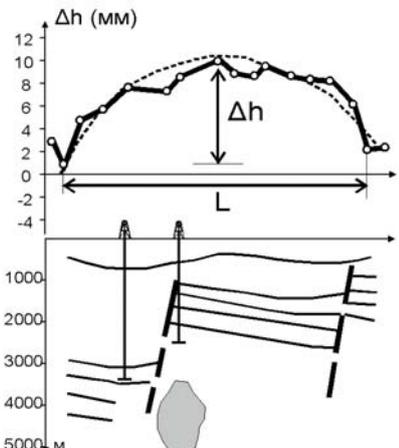
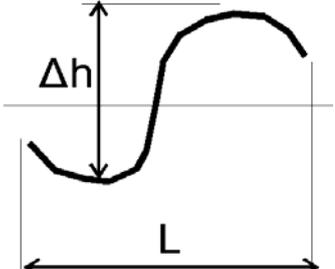
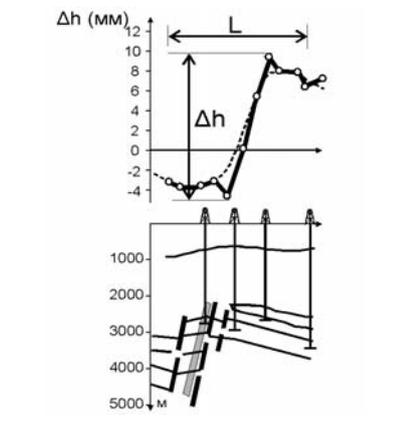
– основные пространственно-временные характеристики аномальных движений идентичны как для сейсмоактивных, так и для асейсмичных разломных зон. При этом интенсивность деформационного процесса в разломах асейсмичных регионов выше, чем в сейсмоактивных;

– установленные типы аномальных движений находятся в определенном соответствии с региональными типами напряженного состояния земной коры. В районах предгорных и межгорных прогибов (области сжимающих напряжений) доминируют β -аномалии, а в рифтовых областях (зоны растяжений) преобладают γ -аномалии.

Отмеченные закономерности были сформулированы в конце XX в. За прошедшие годы был накоплен дополнительный материал по выявленным в зонах разломов деформационным аномалиям. Естественно, что подавляющее большинство этих данных было получено по материалам повторного нивелирования вдоль профилей, которые пересекали приразломные участки. Существенный вклад в общую коллекцию деформационных аномалий внесли результаты, полученные на геодинамических полигонах, которые были созданы на месторождениях нефти и газа и подземных хранилищах газа. Так, к настоящему времени надежно выявлено 2 037 «приразломных» аномалий вертикальных смещений земной поверхности различного типа. Оказалось, что подавляющее количество аномалий представлено локальными симметричными (квазисимметричными) просадками земной поверхности в зонах разломов, то есть аномалиями типа γ (88 %). Количество аномалий типа β составило 9 %. Наименее

распространенными типами аномалий оказались локальные смещения типа S (3 %) [4–8]. В отдельных случаях эти результаты были дополнены материалами измерения горизонтальной компоненты движений, полученными по данным наземной и спутниковой геодезии, а также результатами математического моделирования [9–14].

Основные типы аномальных изменений современных вертикальных движений земной поверхности в пределах зон разломов

Типы аномалий	Соотношение признаков	Практические примеры аномалий и местоположение их источников
<p>Тип γ Локальный изгиб</p>	<p>$\Delta h \gg mL$</p> 	
<p>Тип β Региональный изгиб</p>	<p>$\Delta h < mL$</p> 	
<p>Тип S Дифференцированные движения бортов разломов</p>	<p>$\Delta h \sim mL$</p> 	

Как видно из таблицы, аномалии различаются не только по морфологии, но и по соотношению между Δh и L . Приведенная классификация аномалий носит относительный характер и зависит, в частности, от пространственного масштаба (изученности) исходных данных. Вместе с тем, данная классификация представляется наиболее оптимальной, поскольку, как будет показано ниже, каждый тип аномалии может быть отождествлен с конкретным механизмом деформирования.

Как известно из механики деформируемых сред [15], напряженно-деформированное состояние можно характеризовать силовым (теория напряжений), геометрическим (теория деформаций) и реологическим (связь напряжений и деформаций для различных типов сред) образом. Результаты геодезических наблюдений за смещениями закрепленных точек на земной поверхности и оснований зданий и сооружений естественным образом описываются с помощью геометрической теории деформаций, которая не связана с реологическими свойствами среды (упругими, пластическими, вязкими и т. п.).

Согласно выявленной классификации аномальных движений, необходима формализация регионального изгиба, локального изгиба и сдвига бортов разлома. Для определения типа деформирования земной поверхности по результатам повторного геометрического нивелирования для трех смежных реперов в работе [3] предложено использовать безразмерные комбинации из параметров наклона α и изгиба β (γ). Если через одну из секций нивелирного хода проходит разлом, то соотношение величин α и β (γ) позволяет судить о степени однородности деформирования приразломной зоны. В случае, если разлом кинематически пассивен, то возможны только две ситуации, которые могут быть отражены по данным повторного нивелирования. Либо вертикальные движения всех реперов равны нулю, либо существуют аномальные движения в виде однородного наклона. Кинематическая (деформационная) активизация разлома в форме любого из отмеченных в таблице типов аномалий обязательно приведет к нарушению однородности деформирования исследуемого участка земной поверхности.

Для количественной характеристики степени однородности деформирования одним из авторов данной статьи введен безразмерный P [3]:

$$P = \frac{[|\alpha| - |\beta(\gamma)|]}{[|\alpha| + |\beta(\gamma)|]}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{l_1} + \frac{\Delta h_2}{l_2} \right)$; $\beta = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{l_1} - \frac{\Delta h_2}{l_2} \right)$.

Этот параметр удобнее простого соотношения $|\alpha|/|\beta(\gamma)|$, так как при $\beta(\gamma) \rightarrow 0$, $|\alpha|/|\beta(\gamma)| \rightarrow \infty$. Не лишен подобных недостатков и логарифм от-

ношения параметров. Предложенный параметр не имеет особых точек и изменяется в интервале $|-1; 1|$. Он по своей сути подобен известному параметру Лоде – Надаи, который характеризует тип напряженно-деформированного состояния.

Каждому значению P соответствует вполне определенный тип деформирования. Так, при $P = -1$ имеет место чистый изгиб – аномалия типа $\beta(\gamma)$, что означает максимальное нарушение однородности деформирования (рис. 1, а). В случае, когда $P = 0$ возможно проявление неоднородности деформирования за счет возникновения S аномалии на разломе (рис. 1, б). Значению $P = +1$ соответствует однородный наклон, который «не замечает» разломную зону (рис. 1, в).

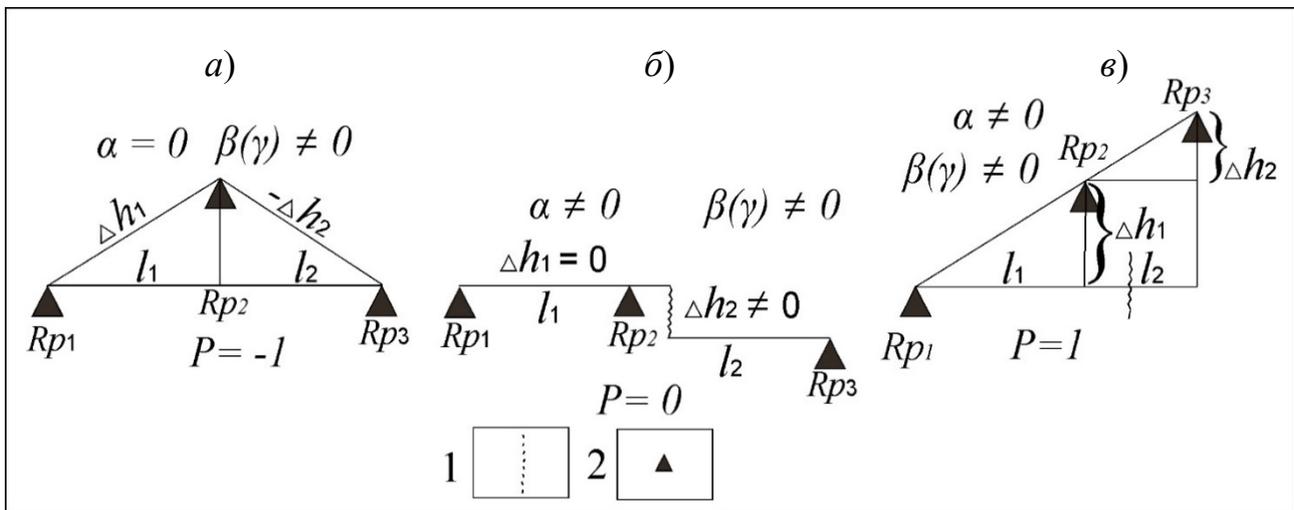


Рис. 1. Определение типа аномалий вертикальных движений в зонах разломов (схема для трех реперов):

а) чистый изгиб; б) неоднородное деформирование (сдвиг); в) однородный наклон; 1 – положение разломов; 2 – местоположение реперов

Этот параметр удобно применять для изучения периодов нарушения однородности деформирования при проведении наблюдений на режимных приразломных участках. Однако принципиально важно отметить, что высокая степень неоднородности ($P \rightarrow -1$) может быть обусловлена как локальным проявлением сдвигов бортов разлома (S -аномалия), так и изгибом (β - и γ -аномалии) в окрестностях тектонического нарушения.

Для того, чтобы разделить вклад каждого из типов аномалий, параметр P был модифицирован в параметр Q [3]. В новом параметре Q в рассмотрение введено не две секции нивелирования (три пункта, разлом проходит через одну из секций), а три секции (четыре пункта, разлом проходит через среднюю секцию) (рис. 2).

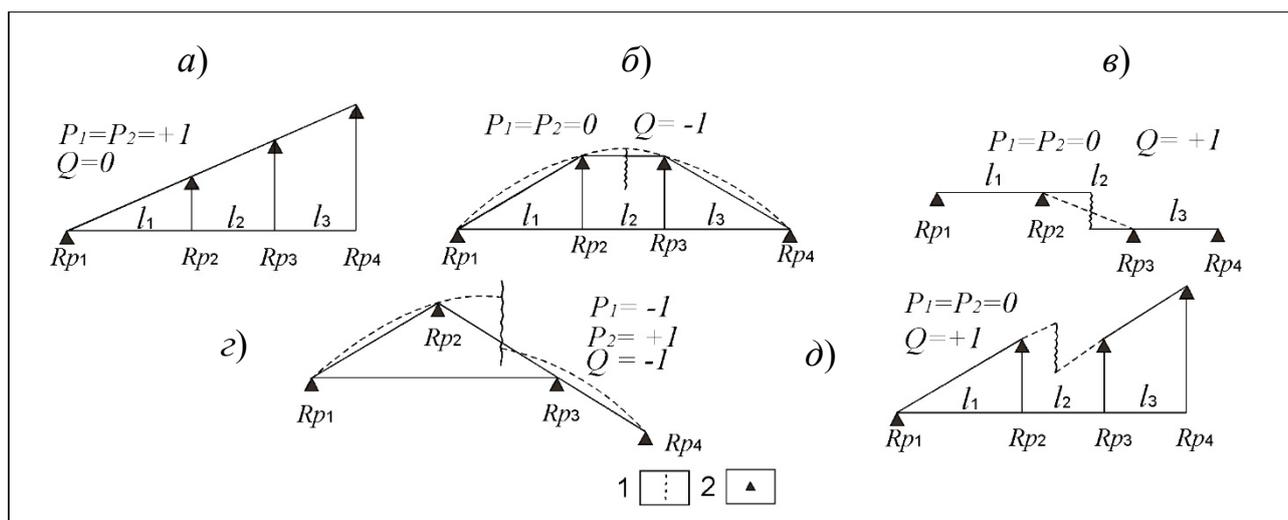


Рис. 2. Определение типа аномалий вертикальных движений в зонах разломов (схема четырех реперов):

- а) однородный наклон; б) изгиб; в) сдвиг; г) изгиб со сдвигом по разлому; д) наклон со сдвигом; 1 – положение разломов; 2 – местоположение реперов

Для однозначного выявления S -аномалии, как ступенеобразного вертикального сдвига в зоне разлома, используется естественное геодинамическое условие: дифференцированные смещения смежных реперов внутри блоков должны устремляться к нулю, а разность вертикальных смещений реперов в секции, пересекающей разлом, должна быть максимальна. В этом случае «дефектная» секция, внутри которой находится разрывное нарушение, является областью локального деформирования, а левая и правая секции могут быть условно названы «региональными». Для того, чтобы для четырех пунктов ввести параметр, аналогичный P , необходимо рассмотреть суперпозицию трех левых и трех правых пунктов. Для них необходимо найти соответствующие наклоны α_1 и α_2 и изгибы $\beta(\gamma)_1$ и $\beta(\gamma)_2$. Средние значения наклона и изгиба будут

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{2} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{l_1} + \frac{\Delta h_2}{l_2} + \frac{\Delta h_3}{l_3} \right); \quad (2)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{2} \cdot (\beta(\gamma)_1 + \beta(\gamma)_2) = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{l_1} - \frac{\Delta h_3}{l_3} \right). \quad (3)$$

Тогда для определения величин «региональных» наклона и изгиба необходимо исключить «дефектную» секцию, которая искажает их значения

$$\alpha_p = \frac{1}{2} \cdot \left(2 \frac{\Delta h_2}{l_2} - \frac{\Delta h_1}{l_1} - \frac{\Delta h_3}{l_3} \right). \quad (4)$$

Так как в общем случае имеет место суперпозиция регионального наклона, изгиба и дифференцированных движений бортов разлома, то сначала необходимо освободиться от «регионального» наклона, для чего введена величина модифицированного наклона α^*

$$\alpha^* = \bar{\alpha} - \alpha_p = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{l_1} + \frac{\Delta h_3}{l_3} \right). \quad (5)$$

Затем, освобождаясь от «регионального» изгиба, аналогично вводится модифицированный изгиб $\beta(\gamma)^*$

$$\beta(\gamma)^* = \overline{\beta(\gamma)} - \beta(\gamma)_p = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h_3}{l_3} - \frac{\Delta h_1}{l_1} \right). \quad (6)$$

Из величин α^* и $\beta(\gamma)^*$ образуется параметр Q , аналогичный P

$$Q = \frac{|\alpha^*| - |\beta(\gamma)^*|}{|\alpha^*| + |\beta(\gamma)^*|}. \quad (7)$$

В зависимости от соотношения α^* и $\beta(\gamma)^*$ параметр Q изменяется в интервале $[-1; 1]$ аналогично параметру P . Если разлом, который пересекает нивелирный профиль, не активен, а вертикальные движения земной поверхности проявляются в виде однородного наклона, то значение $Q = 0$ (рис. 2, а). Величина $Q = -1$ означает наличие $\beta(\gamma)$ -аномалии (рис. 2, б). Значению $Q = +1$ соответствует S -аномалия (рис. 2, в).

Данная методика применялась для оценки степени однородности деформирования разломных зон в Копетдагском сейсмоактивном регионе [3]. Кроме этого, в нескольких работах В. Г. Колмогорова этот подход активно использовался для оценки характера современной кинематической активности разломов Сибири [16–20]. В этих работах методика формализованных критериев P и Q применялась на основе результатов повторных нивелирных наблюдений вдоль длинных (региональных) профилей различной протяженностью (от 86 до 1 166 км). Среднее расстояние между реперами составляло примерно 9,5 км. Для ряда разломов Алтае-Саянской области был определен тип деформации земной поверхности. На основании таблицы, приведенной в работе [21], самый распространенный тип деформации, выявленный по результатам анализа нивелирных профилей, – это S -аномалии. Более того, по этим исследованиям не были обнаружены аномалии типа γ .

Отсутствие аномалий локального изгиба и доминирование аномалий типа S объясняется не только тем, что расстояния между реперами оказались весьма значительными. Дело в том, что детальный анализ различных кинематических

ситуаций показал некоторую ограниченность предложенного параметра Q . Из рис. 2 следует, что одному и тому же значению параметра могут соответствовать не только «чистые» аномалии сдвига, изгиба и наклона, но и комбинированные варианты аномалий. Например, рис. 2, ε отражает изгиб со сдвигом по разлому, а рис. 2, δ – наклон со сдвигом.

Для того, чтобы увеличить эффективность использования безразмерных параметров для типизации кинематических режимов современной динамики разломных зон, в данной работе предложен новый подход. В качестве основных морфологических признаков сдвига и изгиба предложено использовать характер поведения вертикальных смещений непосредственно в зоне разлома. Для этой цели были использованы расчетные вертикальные смещения поверхности от моделей сдвиговых и раздвиговых разломов, которые описывают формирование локальных деформаций для S - и γ -аномалий, соответственно (рис. 3).

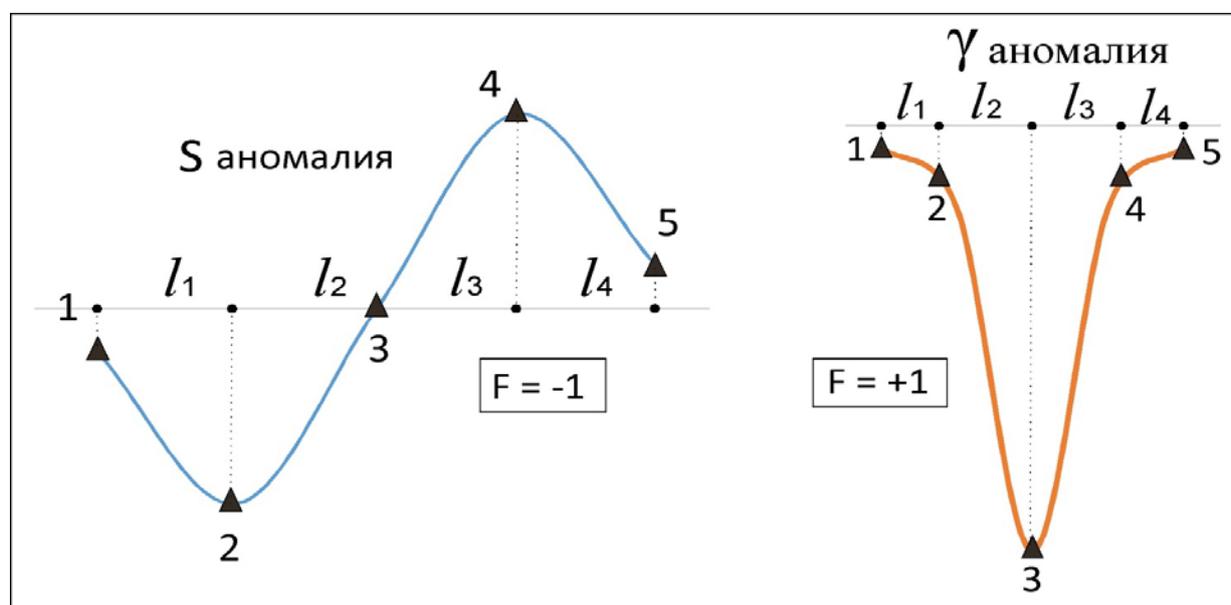


Рис. 3. Распределение расчетных вертикальных смещений земной поверхности, моделирующих S - и γ -аномалии

На рис. 3 показаны кривые, построенные в рамках дислокационной модели сдвиговых [22, 23] разломов и модели раздвиговых разломов [2, 14], при которых формируются локальные оседания земной поверхности в окрестности разлома. Как видно из рисунка, при использовании схемы для пяти реперов, когда средний репер (№ 3) расположен в центральной части разлома, кинематика реперов № 2, 3, 4 для обеих типов аномалий представляет собой наклон (S -аномалия) и симметричный изгиб (γ -аномалия).

Для того, чтобы для пяти пунктов ввести параметры, аналогичные P и Q , необходимо снова рассмотреть суперпозицию трех левых и трех правых реперов. Для них следует найти средние значения наклона и изгиба, а затем вычесть их региональные (фоновые значения) аналогично той процедуре, которая была

использована выше. После проведения необходимых преобразований были получены значения для модифицированного наклона α^*

$$\alpha^* = \bar{\alpha} - \alpha_{\phi} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h_2}{l_2} + \frac{\Delta h_3}{l_3} - \frac{\Delta h_1}{l_1} - \frac{\Delta h_4}{l_4} \right). \quad (8)$$

Аналогично получено выражение для модифицированного изгиба $\beta(\gamma)^*$:

$$\beta(\gamma)^* = \overline{\beta(\gamma)} - \beta(\gamma)_{\phi} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta h_4}{l_4} + \frac{\Delta h_3}{l_3} - \frac{\Delta h_1}{l_1} - \frac{\Delta h_2}{l_2} \right). \quad (9)$$

Из величин α^* и $\beta(\gamma)^*$ вычисляется параметр F , аналогичный параметру Q , построенному для схемы четырех реперов

$$F = \frac{|\alpha^*| - |\beta(\gamma)^*|}{|\alpha^*| + |\beta(\gamma)^*|}. \quad (10)$$

В зависимости от соотношения α^* и $\beta(\gamma)^*$, параметр F изменяется в интервале $[-1; 1]$ аналогично параметру Q . Значению $F = -1$ соответствуют S -аномалии, значение $F = +1$ означает доминирование в зоне разлома $\beta(\gamma)$ -аномалии (региональный и локальный изгиб, соответственно). Таким образом, параметр F служит своеобразным фильтром, который производит селекцию типов аномалий, когда спектр наблюдаемых движений состоит из совокупности аномалий различных типов.

Отсюда вытекает следующая методика количественного определения степени однородности деформирования и выявления типов аномальных движений. На первом этапе по определяются параметры P_1 и P_2 (для трех левых и для трех правых пунктов). Следует подчеркнуть, что схема для пяти реперов, в отличие от схемы для четырех реперов, позволяет проводить эту процедуру без перекрытия значений превышений, полученных на смежных секциях. Именно это позволяет в рамках схемы для пяти реперов проводить более строгую селекцию аномалий.

Если P_1 и $P_2 \rightarrow 1$, то это свидетельствует в пользу высокой степени однородности деформирования и отсутствия аномальных, локальных смещений непосредственно в зоне разлома. Если среднее значение $P_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (P_1 + P_2) \rightarrow 0$, то в этом случае имеют место аномальные движения. Рассчитанный в этом случае параметр F свидетельствует о том, какой именно тип аномалии доминирует в данной разломной зоне.

Касаясь применения формализованных критериев разделения аномалий в пространственном масштабе, следует заметить, что, имея формулы для параметров P и F , а также задаваясь выявленными характеристиками аномалий (размер L и соотношение $\Delta h/l$), можно проводить скользящее определение

и разделение типов аномального деформирования вдоль протяженных нивелирных линий, пересекающих несколько разломных зон.

Следует отметить, что в зависимости от пространственной детальности измерений параметр F способен выявлять, как региональный (β -аномалия), так и локальный (γ -аномалия) изгибы. Учитывая, что в последние годы резко усилился интерес к выявлению зон опасных разломов [4, 12], расположенных как в нефтегазоносных, так и сейсмоактивных регионах, ниже демонстрируются возможности предлагаемой методики для выявления характера локального деформированного состояния разломных зон, когда пространственная детальность наблюдений (расстояние между реперами) достигала 50–100 м.

На рис. 4 представлены данные нивелирования, полученные при геодинимическом мониторинге подземного хранилища газа (ПХГ). Графики построены в «пульсационном» представлении, когда каждое текущее значение смещений построено относительно предыдущего цикла измерений [7, 10]. Подобное построение наиболее удобно при анализе повторных наблюдений на объектах, испытывающих циклическое (периодическое) нагружение. Именно таким объектом является ПХГ, когда закачка и отбор газа производятся строго два раза в год на протяжении десятков лет.

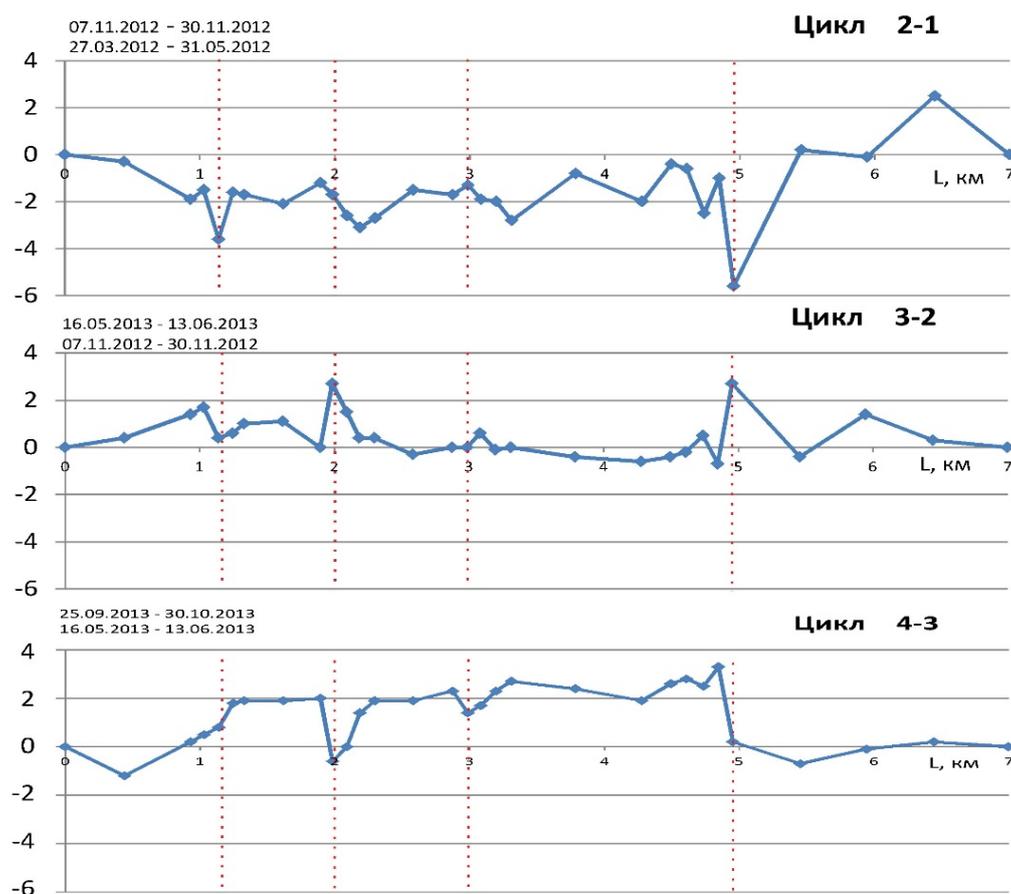


Рис. 4. Результаты повторных высокоточных нивелирных наблюдений на одном из подземных хранилищ газа. Пунктирными линиями обозначены разломные зоны

Как видно из рис. 4 в выделенных четырех разломных зонах наиболее ярко видны локальные аномальные смещения. Очевидно, что в период отбора газа (цикл 2-1) в зонах разломов имеют места локальные просадки земной поверхности. В цикле 3-2 (нейтральный период) локальные аномалии продолжают инерционно развиваться. И наконец, в цикле 4-3, который соответствует максимальной закачке газа, аномальные вертикальные смещения земной поверхности испытывают инверсию движения. Это свидетельствует о том, что циклические воздействия на геологическую среду приводят к тому, что меняется кинематика (тип подвижек земной поверхности) в зонах разломов, которые имеют места в геологическом разрезе данного подземного хранилища газа.

При формализованном анализе данных при помощи параметра F совсем не обязательно сравнивать графики в целом. Для начала достаточно, используя параметр P , выявить зоны неоднородного деформирования, а затем выбрать конкретную разломную зону и с помощью параметра F фиксировать динамику изменения типа деформирования земной поверхности во времени. При этом важно помнить, что расчет безразмерных параметров осуществляется только после тщательной метрологической селекции данных и, в первую очередь, исключения сезонных и других периодически действующих помех на основе спектрально-временного анализа [24].

На рис. 5 показана динамика изменения характера деформирования земной поверхности в первой разломной зоне. В цикле 2-1 в ноябре 2012 г. во время отбора газа года хорошо прослеживается локальный изгиб (γ -аномалия), где $F = 0,8$. В цикле 3-2, когда измерения попали на нейтральный период работы ПХГ, $F = 0,1$, что говорит о том, что в этот момент преобладает практически однородный наклон и, наконец, в цикле 4-3 $F = -0,35$, что соответствует преобладанию в данной области сдвига (S -аномалии).

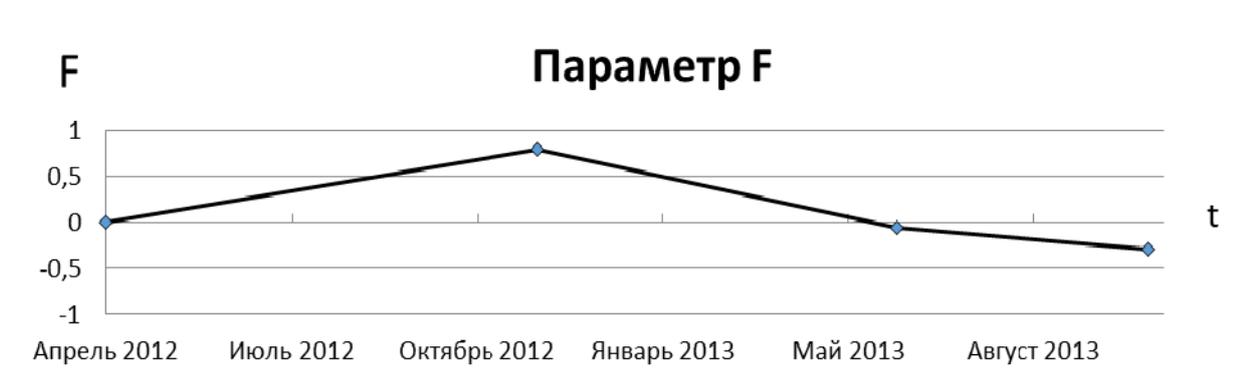


Рис. 5. Динамика параметра F на примере первой слева разломной зоны

Другой пример эффективного использования безразмерных параметров иллюстрируется на примере уникальных высокоточных многократных нивелирований на геодинамическом полигоне, расположенном в пределах Камчатского сейсмоактивного региона [25]. Нивелирный профиль, пересекающий три локальные зоны разломов, выявленных по геолого-геофизическим данным, длиной 2,6 км повторялся 155 раз в течение почти трех лет с частотой опроса 1-2 раза в неделю. Наблюдения проводились по программе 1-го класса. Расстояние между реперами составило 80–100 м (рис. 6).

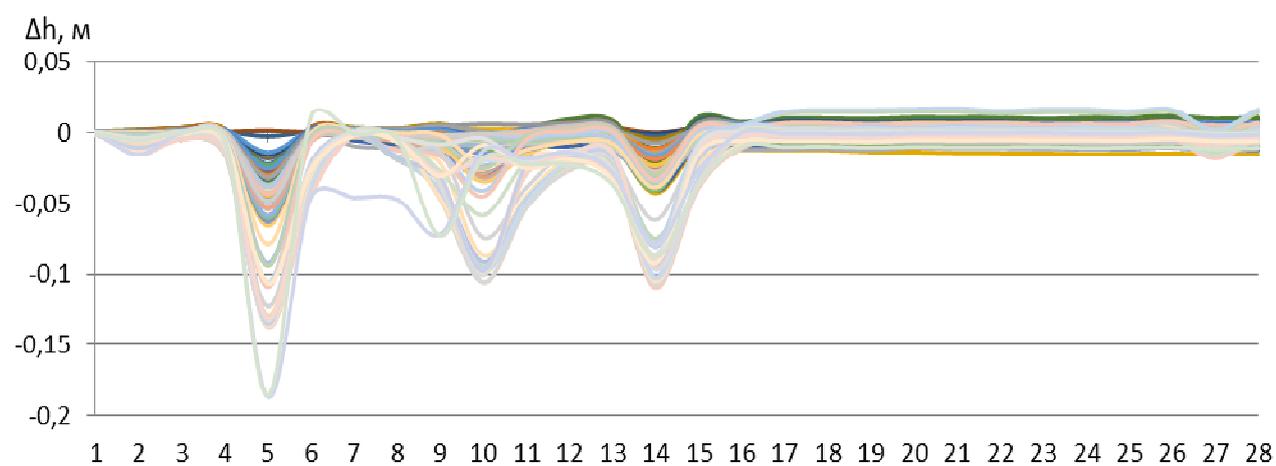


Рис. 6. Распределение вертикальных смещений земной поверхности на нивелирном профиле относительно первого репера (Камчатка)

На рис. 6 показано пространственное распределение вертикальных смещений земной поверхности вдоль этого профиля за весь период наблюдений. Очевидно, что разломные зоны представлены тремя аномальными просадками типа γ . Характерным для всех трех аномалий является ярко выраженный пульсационный и симметричный характер просадок. Периоды интенсивного опускания перемежаются с периодами относительного покоя, затем процесс проседания возобновляется. В отдельные промежутки времени наблюдаются периоды незначительных (меньших на порядок) инверсионных движений. Амплитуды локальных максимумов в этот период незначительно уменьшаются. Однако в целом имеет место устойчивая тенденция к пульсационному, последовательному проседанию локальных участков земной поверхности. Ширина аномалий колеблется от 200 до 500 м, а их амплитуда достигает 10–12 см, длительность пульсационных процессов заключена в интервале от нескольких недель до нескольких месяцев. Среднегодовая скорость относительных деформаций достигает величин 10^{-4} в год [26].

Из рис. 7 видно, что характер деформирования трех разломных зон в течение времени эволюционирует различным образом. Параметр F для левого и правого разлома на протяжении всего периода наблюдений устойчиво отме-

чает доминирование аномалии локального изгиба (тип γ). Исключение составляет период с декабря 1997 г. по апрель 1998 г., в течение которого произошла подготовка и реализация ощутимого Камчатского землетрясения с $M = 7,1$, которое произошло на расстоянии около 100 км от нивелирного профиля [27]. Этот период характерен тем, что в зоне этих разломов к локальным изгибам (просадкам земной поверхности) добавляются и незначительные сдвиговые перемещения, которые изменяют значение параметра F с 0,95 до 0,5. Это означает, что в сложном приразломном движении, в котором всегда присутствует суперпозиция изгибов и сдвигов земной поверхности, деформация локального изгиба вначале превосходила сдвиговую почти в 40 раз, а в период подготовки землетрясения – всего в 3 раза.

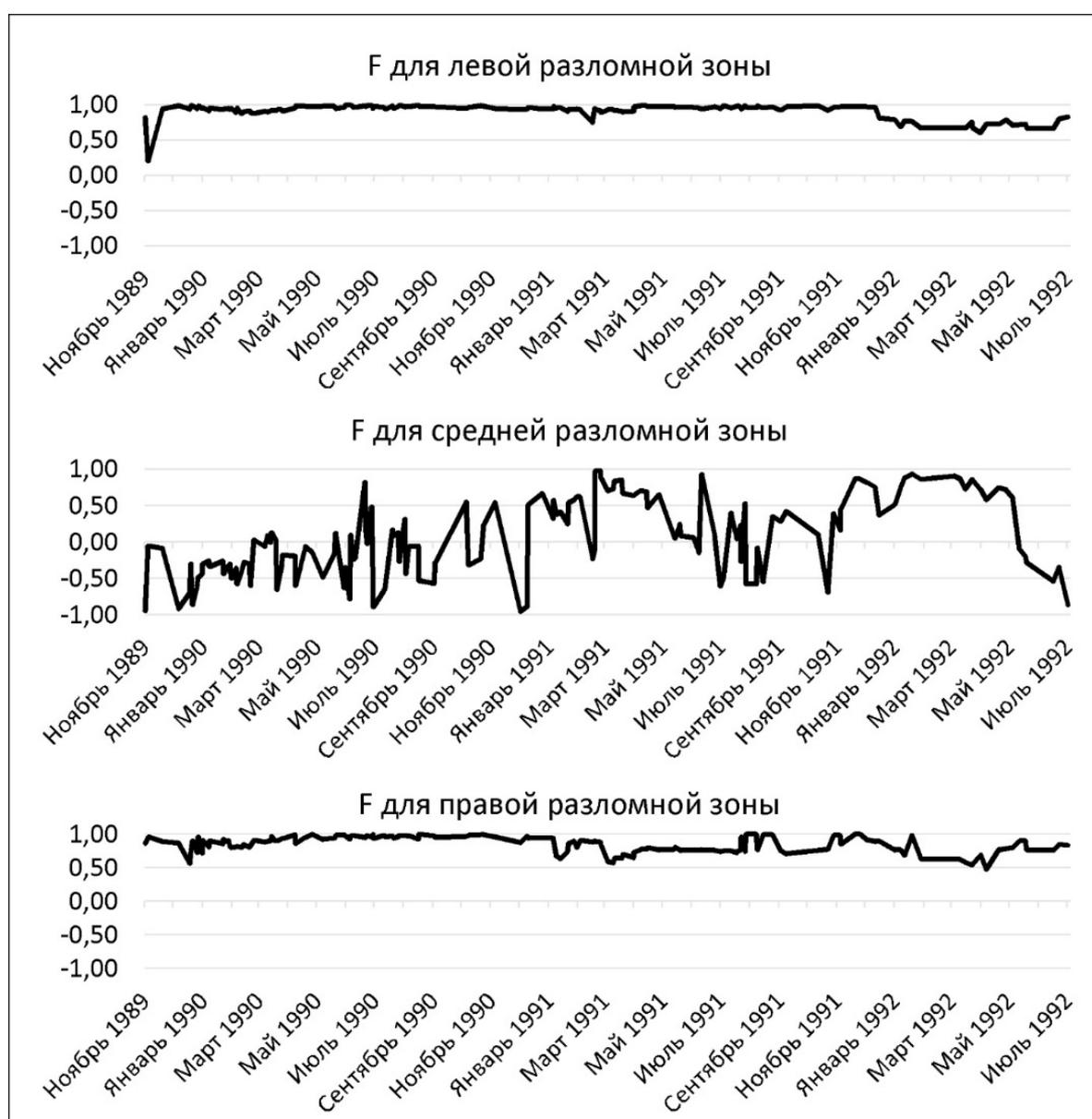


Рис. 7. Временной ход параметра F для нескольких приразломных зон (Камчатка)

Совершенно иной характер имеет поведение деформационного процесса в средней сдвиговой зоне. Там среднее значение параметра $F = -0,7$ отмечалось в течение всего первого года наблюдений. Затем в течение полугода знак параметра изменился на противоположный и с августа 1991 г. происходили знакопеременные флуктуации параметра F . Это свидетельствует о том, что в среднем разломе присутствует полный набор кинематических ситуаций. Есть периоды, когда сдвиговые смещения преобладают над оседаниями, и существуют интервалы времени, когда доминируют локальные изгибы. В среднем за весь период наблюдений локальные изгибы (оседания) превосходят сдвиги примерно в 5 раз, что и отразилось в итоговой, накопленной кривой вертикальных смещений в пределах среднего разлома.

Таким образом, разработанная формализованная методика исследования режимов локальных движений земной поверхности в зонах активных разломов является пространственным фильтром, позволяющим осуществлять селекцию сложного деформационного процесса по элементарным (базовым) кинематическим типам смещений, используемым в геометрической теории деформаций. Кроме того, этот подход позволяет исследовать тектонофизические и геомеханические закономерности формирования и развития процессов разломообразования в земной коре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон осадочных бассейнов и процессы подготовки землетрясений // Прогноз землетрясений. – 1989. – № 11. – С. 52–60.
2. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при нефтепользовании. – М. : Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.
3. Сидоров В. А., Кузьмин Ю. О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. – М. : Междуведомственный геофизический комитет СССР, 1989. – 189 с.
4. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 1. – С. 33–41.
5. Кузьмин Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51–64.
6. Хисамов Р. С., Гатиятуллин Н. С., Кузьмин Ю. О. и др. Современная геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана / под ред. Р. С. Хисамова и Ю. О. Кузьмина. – Казань: Фэн, 2012. – 240 с.
7. Анализ деформаций земной поверхности на Степновском подземном хранилище газа методами спутниковой и наземной геодезии / С. С. Квятковская, Ю. О. Кузьмин, Р. С. Никитин, Е. А. Фаттахов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 16–32.
8. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина / Ю. О. Кузьмин, А. В. Дещеревский, Е. А. Фаттахов, Д. К. Кузьмин, А. А. Казаков, Д. В. Аман // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 53, № 3. – С. 31–41.
9. Кузьмин Ю. О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 98–107.
10. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 401–443.

11. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 25–30.
12. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 87–101.
13. Кузьмин Ю. О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // Физика Земли. – 2017. – № 6. – С. 24–39.
14. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. – 2018. – № 6. – С. 87–105.
15. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела : учеб. пособие для вузов. – М. : Наука, 1979. – 743 с.
16. Колмогоров В. Г., Колмогорова П. П. Современная кинематика земной поверхности юга Сибири. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 153 с.
17. Колмогоров В. Г. Оценка современной кинематики разломов Сибири по геодезическим данным // Методика и результаты изучения пространственно-временных вариаций геофизических полей : сб. науч. тр. РАН, Сиб. отд-ние: Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. Науч. редакторы А. Д. Дучков, В. В. Кузнецов. – Новосибирск, 1992. – С. 159–172.
18. Колмогоров В. Г. Методика и результаты изучения кинематических характеристик земной поверхности по данным повторного нивелирования. // Современная геодинамика литосферы Сибири : сб. науч.тр. АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т геологии и геофизики. – Новосибирск : ИГиГ, 1986. – 173 с.
19. Колмогоров В. Г. К вопросу тектонофизической интерпретации геокинематических параметров Сибири // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 2. – С. 122–126.
20. Колмогоров В. Г., Асташенков Г. Г. О возможности изучения деформационного состояния земной поверхности по результатам повторного высокоточного нивелирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 16–17.
21. Колмогоров В. Г., Лисицкий Д. В. Современная активность разломов и сейсмичность Алтае-Саянской области // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 28–32
22. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1985. – Vol. 75. – P. 1135–1154.
23. Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. Am. – 1992. – Vol. 82. – P. 1018–1040.
24. Фаттахов Е. А. Спектрально-временной анализ светодальномерных наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 5–17.
25. Churikov V. A., Kuzmin Yu. O. Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia // Geophysical Journal International. – 1998. – Vol. 133. – P. 607–614.
26. Грунин А. Г., Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Проблемные вопросы проектирования геодинамических полигонов на месторождениях УВ // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 6. – С. 24–31.
27. Кузьмин Ю. О., Чуриков В. А. Механизм формирования аномальных деформационных процессов в период подготовки Камчатского землетрясения 2 марта 1992 г. // Вулканология и сейсмология. – 1998. – № 6. – С. 37–50.

Получено 03.10.2018

© Ю. О. Кузьмин, Е. А. Фаттахов, 2018

ANALYSIS OF OBSERVATION REPEATED LEVELING IN FAULT ZONES METHODS OF DEFORMATION THEORY

Yurii O. Kuzmin

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10-1, Bolshaya Gruzinskaya St., Moscow, 123242, Russia, D. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Recent and Applied Geodynamics, phone: (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Evgeniy A. Fattakhov

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10-1, Bolshaya Gruzinskaya St., Moscow, 123242, Russia, Junior Researcher, phone: (499)254-65-65, e-mail: Fea@ifz.ru

Due to the need for tectonophysical interpretation of anomalous vertical displacements of the earth's surface in active fault zones, a formalized approach was proposed for the selection of movement types. The classification of anomalous, vertical displacements of the earth's surface in fault zones is given. It is shown that all abnormal changes are reduced to three main types of deformations: regional bending, local bending and vertical shear. On the basis of the geometric theory of deformations, dimensionless parameters are used to reveal the dominance of basic geomechanical mechanisms (vertical shear, alternating bending) in time. On a number of geodynamic polygons (seismoprostnogenic and technogenic), the implementation of the entered parameter F , which is a spatial filter, is shown, which reveals the dominant role of a specific type of anomalous activation. The materials of repeated leveling observations along profiles crossing several fracture zones are presented. The periods of changing the local mechanism of deformation activity of faults in time are revealed. A technique has been developed that allows averaging of shear and bending movements along leveling lines intersecting several fault zones and establishing the dominant type of anomalies over the entire observation period for each fracture.

Key words: modern geodynamics, geodynamic monitoring, geodesy, leveling, vertical movements, fault zones, deformation processes in fault zones, observations.

REFERENCES

1. Kuzmin, Yu. O. (1989). Recent geodynamics and evaluation of geodynamic risk at use of subsoil resources. *Prognoz zemletrjasenij [Forecast of Earthquakes]*, 11, 52–60 [in Russian].
2. Kuzmin, Yu. O. (1999). *Sovremennaja geodinamika i ocenka geodinamicheskogo riska pri nedropol'zovanii [Recent geodynamics and evaluation of geodynamic risk at use of subsoil resources]*. Moscow: Agentstvo jekonomicheskikh novostej, 220 p. [in Russian].
3. Sidorov, V. A., & Kuzmin, Yu. O. (1989). *Sovremennye dvizhenija zemnoj kory osadochnyh bassejnov [Recent crustal movements in sedimentary basins]*. Moscow: Mezhdovedomstvennyj geofizicheskij komitet SSSR, 189 p. [in Russian].
4. Kuzmin, Yu. O. (2007). Recent geodynamics of faults and environmental and industrial safety of oil and gas facilities. *Geologija, geofizika i razrabotka nefjtjanyh i gazovyh mestorozhdenij [Geology, geophysics and development of oil and gas fields]*, 1, 33–41 [in Russian].
5. Kuzmin, Yu. O. (2014). The topical problems of identifying the results of the observations in recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(5), 641–654.
6. Khisamov, R. S., Gatiyatullin, N. S., Kuzmin, Yu. O., et al. (2012). *Sovremennaja geodinamika i sejsmichnost' Jugo-Vostoka Tatarstana [Recent Geodynamics and Seismicity of the Southeastern Tatarstan]*. R. S. Khisamov, & Yu. O. Kuzmin (Eds.). Kazan: Fen Publ., 240 p. [in Russian].

7. Kwiatkowska, S. S., Kuzmin, Yu. O., Nikitin, R. S., & Fattakhov, E. A. (2017). Analysis of the deformations of the ground surface on Stepnovskaya underground gas storage by methods of satellite and ground-based geodesy. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 16–32 [in Russian].
8. Kuzmin, Yu. O., Deshcherevskii, A. V., Fattakhov, E.A., Kuzmin, D. K., Kazakov, A. A., & Aman, D. V. (2018). Analysis of the results of inclinometric observations at the field of Yu. Korchagin. *Geofizicheskie processy i biosfera [Geophysical Processes and Biosphere]*, 53(3), 31–41 [in Russian].
9. Kuzmin, Yu. O. (2008). Problematic issues of studying the deformation processes in recent geodynamics. *Gornij informacionij-analyticheskij bulletin [Mountain Information and Analytical Bulletin]*, 3, 98–107 [in Russian].
10. Kuzmin, Yu. O. (2014). Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. *Geodynamics & Tectonophysics*, 5(2), 401–443 [in Russian].
11. Kuzmin, Yu. O. (2015). Recent geodynamics of a fault system. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 51(4), 480–485.
12. Kuzmin Yu. O. (2016). Recent geodynamics of dangerous faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 52(5), 709–722.
13. Kuzmin, Yu. O. (2017). Paradoxes of the comparative analysis of ground-based and satellite geodetic measurements in recent geodynamics, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53(6), 825–839.
14. Kuzmin, Yu. O. (2018). Recent geodynamics of tensile faults. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 54(6), 886–903.
15. Rabotnov, Ju. N. (1973). *Mehanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of a deformable solid]*. Moscow: Nauka Publ., [in Russian].
16. Kolmogorov, V. G., & Kolmogorova, P. P. (1990). *Sovremennaja kinematika zemnoj poverhnosti juga Sibiri [Recent kinematics of the earth's surface of the south of Siberia]*. Novosibirsk: Nauka Publ. Sibirskoe otdelennje, 153 p. [in Russian].
17. Kolmogorov, V. G. (1992). An estimation of recent kinematics of faults of Siberia on geodetic data. In *Sbornik nauchnyh trudov AN SSSR: Sovremennaja geodinamika litosfery Sibiri. In-t geologii i geofiziki [Method and results of studying the space-time variations of geophysical fields: Sat. sci. tr. RAS, Sib. Division: Co-ed. Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy. Scientific. editors A.D. Duchkov, V.V. Kuznetsov.]* (pp. 159–172). Novosibirsk: IGI Publ. [in Russian].
18. Kolmogorov, V. G. (1986). Method and results of studying the kinematic characteristics of the earth's surface from the data of repeated leveling. In *sbornik nauchnyh trudov AN SSSR: Sovremennaja geodinamika litosfery Sibiri [Collection of Scientific Papers: Method and Results of Studying the Space-Time Variations of Geophysical Fields]* (173 p). Novosibirsk: IGI Publ. [in Russian].
19. Kolmogorov, V. G. (2009). On the tectonophysical interpretation of the geokinematic parameters of Siberia. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2019: T. 1, ch. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: Vol. 4, Part 2]* (pp. 122–126). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
20. Kolmogorov, V. G., & Astashenkov, G. G. (2012). On the possibility of studying the deformation state of the earth's surface from the results of repeated high-precision leveling. *Izvestiya vuzov. Geodezija i ajerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 16–17 [in Russian].
21. Kolmogorov, V. G., & Lisickij, D. V. (2013). Current fracture activity and seismicity of the Altai-Sayan region. *Izvestiya vuzov. Geodezija i ajerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/C, 28–32 [in Russian].
22. Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135–1154.
23. Okada, Y. (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 1018–1040.

24. Fattakhov, E. A. (2017). Spectral-temporal analysis of laser rangefinder observations on the Kamchatsky and Ashgabad geodynamic polygons. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 5–17 [in Russian].

25. Churikov, V. A., & Kuzmin, Yu. O. (1998). Relation between deformation and seismicity in the active fault zone of Kamchatka, Russia. *Geophysical Journal International*, 133, 607–614.

26. Grunin, A. G., Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2014). Problematic issues of design of geodynamic grounds on UV fields. *Markshejderskij vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 6, 24–31 [in Russian].

27. Kuzmin, Yu. O., & Churikov, V. A. (1999). Anomalous strain generation mechanism before the march 2, Kamchatkan earthquake. *Journal of Volcanology and Seismology*, 20(6), 641–656.

Received 03.10.2018

© Yu. O. Kuzmin, E. A. Fattakhov, 2018

УДК 528.48:624.21

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ БУГРИНСКОГО МОСТА ПРИ ЕГО ИСПЫТАНИЯХ

Владимир Адольфович Середович

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 630008, Россия, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, кандидат технических наук, профессор, e-mail: v.seredovich@list.ru

Александр Владимирович Середович

Научно-исследовательский институт Нефтегазпроект, 625027, Россия, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 70, кандидат технических наук, руководитель группы наземного лазерного сканирования, e-mail: seredovichav@nipingr.ru

Андрей Васильевич Иванов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: geodata1000@gmail.com

Андрей Аркадьевич Шоломицкий

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: sholomitskij@mail.ru

Елена Константиновна Лагутина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: e.k.lagutina@ssga.ru

Рассмотрены различные методики геодезических измерений при испытаниях мостов. Разработана комбинированная методика геодезических измерений, которая включает геодезические измерения роботизированными электронными тахеометрами и лазерным сканером для точек на несущей балке моста, критические точки которой не были доступны для прямых геодезических измерений. Данные измерений, после каждой серии нагрузки, передавались в центр управления для обработки и анализа. Несмотря на установку электронных тахеометров на подвижном основании, предложенная методика позволила с высокой точностью определять деформации дорожного полотна и несущей балки в вертикальной плоскости. Эксперимент по применению спутниковых измерений показал недостатки применяемой схемы измерений и большую зависимость от расположения созвездия спутников относительно экранирующей сетки вант моста. Анализ литературы по испытаниям мостов показал, что использованная авторами методика совместных измерений электронными тахеометрами, лазерными сканерами и ГНСС-приемниками была применена впервые.

Ключевые слова: испытания моста, деформации, геодезические измерения, лазерное сканирование, спутниковые измерения, анализ.

Введение

Перед вводом в эксплуатацию мосты проходят специальную процедуру испытаний, которая должна подтвердить соответствие реакции моста на нагрузки, возникающие при испытаниях, расчетным. Общие положения о необходимости таких испытаний приведены в [1] и являются обязательными. Для каждого моста организацией, ответственной за проведение испытаний, разрабатывается программа со схемой нагрузок и ожидаемыми деформациями моста под воздействием этих нагрузок. Неотъемлемой частью этой программы являются геодезические измерения, которые фиксируют деформации сооружения под нагрузкой. Для балочных мостов при приемке применяется самый простой вид работ – геометрическое нивелирование [2]. Для более сложных в конструктивном отношении мостов используют роботизированные электронные тахеометры [3] или комбинированные методы геодезических и спутниковых измерений [4] с использованием высокоточных инклинометров [5]. Для оценки состояния мостов используются методы лазерного сканирования [6] и фотограмметрии [7].

В последнее десятилетие бурно развивались технологии мониторинга мостов в процессе строительства и эксплуатации. В публикациях [8–23] можно отметить тенденцию использования в системах автоматизированного мониторинга подвесных и вантовых мостов с высокими пилонами спутниковых измерений в режиме реального времени, дополненных другими видами датчиков: инклинометрическими, деформационными, тензометрическими, акселерометрическими [14], метеорологическими и т. д.

Для Бугринского моста программа испытаний была разработана Сибирским государственным университетом путей сообщений в научно-исследовательской лаборатории «Мосты», руководил испытаниями к.т.н. А. Н. Яшнов («Программа обследования и испытаний мостовых сооружений по титулу «Мостовой переход через р. Обь по Оловозаводскому створу в г. Новосибирске. Участок от ПК 83+70 до ПК 138+52.57», 2014 г.).

Технология геодезических измерений разрабатывалась для программы испытаний Бугринского моста, с учетом особенностей его конструкции, коллективом специалистов Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Особенностью было то, что требовалось определить не только вертикальные перемещения дорожного пролета, но и деформации несущей арки в критических точках. Причем эту задачу нужно было решить за ограниченное время, примерно 20 минут, пока 24 груженых песком автосамосвала находятся в определенном положении. Традиционными геодезическими методами [2] решить эту задачу было невозможно, поэтому была разработана комбинированная методика с использованием геодезических лазерных методов измерения, в исследовательских целях использовались спутниковые методы. Идея применения спутниковых методов при испытаниях моста не нова, она использовалась при

строительстве и испытаниях многих мостов, например знаменитого вантового моста в Милао (Франция) [4]. Отличие заключалось в том, что критические точки арки моста были недоступны для прямых геодезических и спутниковых измерений. Поэтому изменение их положения отслеживалось с помощью лазерного сканера, расположенного в центре пролета.

Методика геодезических измерений. Линейно-угловые измерения

Для измерений использованы роботизированные электронные тахеометры Leica TM-30 и Leica TPS 1201, с точностью измерения углов 0,5 и 1", соответственно.

В связи с тем, что на опорах моста во время испытаний велись отделочные работы и размещалось подъемное оборудование, невозможно было установить электронные тахеометры на неподвижной части опор. Была принята схема относительных измерений, показанная на рис. 1.

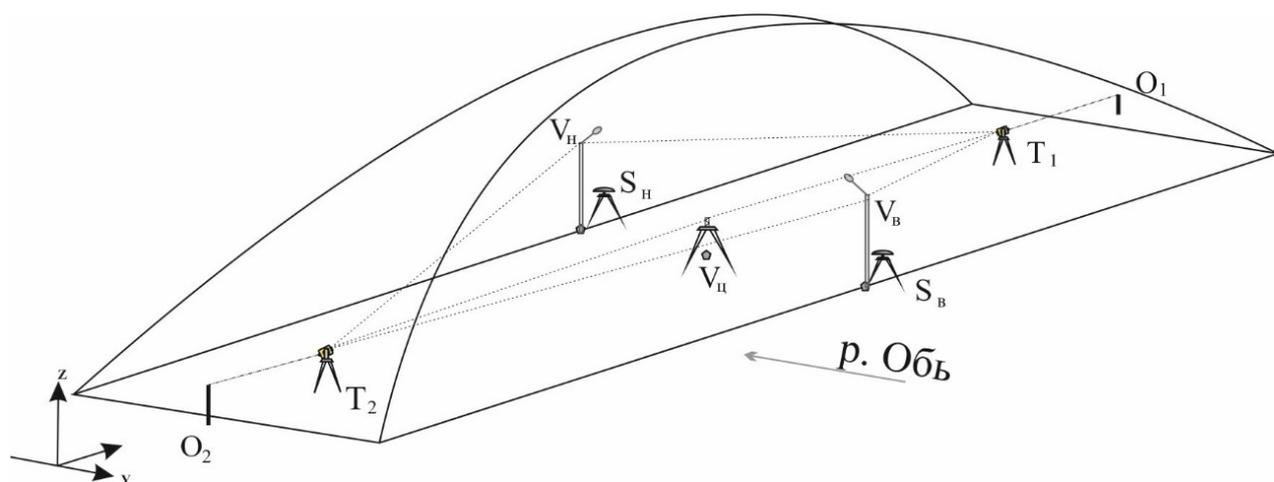


Рис. 1. Схема геодезических измерений Бугринского моста

На рис. 1 точки стояния тахеометра обозначены буквами T_1 и T_2 , ориентирные точки O_1 и O_2 , определяемые точки $V_н$, $V_в$ представляли собой отражательные пластины, наклеенные на осветительные столбы (рис. 2, а), $V_ц$ – отражательная призма 360° фирмы Leica для автоматических измерений (рис. 2, б).

При установке самосвалов по новой схеме нагружения выполнялось переопределение положения тахеометра относительно ориентирных точек O_1 и O_2 . Автоматические тахеометры в режиме самонаведения выполняли измерения на три точки, расположенные на оси моста, в том числе и на точку $V_ц$. Такая методика позволила надежно определить отметки точек, с точностью $\pm 1,5$ мм.



Рис. 2. Элементы и приборы геодезических измерений:

а) отражательная пленка на осветительном столбе; б) положение сканера и отражательной призмы $V_{ц}$

Наземное лазерное сканирование

Дополнительно к основным геодезическим измерениям проводилось наземное лазерное сканирование (НЛС) с помощью сканера Leica ScanStation C10, с целью дальнейшего определения на основе полученных точечно-пространственных (облаков точек) моделей этапов нагрузки различных недоступных геометрических параметров конструкций моста. Сканирование производилось с одной точки, расположенной в геометрическом центре (рис. 2, б) и закрепленной на пролетном строении моста, остававшейся без изменения положения сканера на всех этапах испытания моста. Для установки прибора использовался тяжелый деревянный штатив в опущенном состоянии, с целью максимального исключения случайных горизонтальных и вертикальных передвижений лазерного сканера, а также для исключения эффектов температурного влияния.

После каждого этапа нагрузки моста производился контроль горизонтальности положения лазерного сканера с помощью встроенного точного электронного уровня, а также высоты установки прибора путем дополнительного сканирования трех заранее закрепленных точек на поверхности пролетного строения с известными относительными отметками (параметры сканирования точек, область 10×10 см и с шагом 1×1 мм, схема размещения представлена на рис. 3). После идентификации координат контрольных точек в области сканирования определялось наклонное расстояние между точкой и координатами геометриче-

ского центра лазерного сканера. Так контролировалась высота установки прибора. В центре арочной фермы сканер выполнял измерения на сферические марки, которые использовались при контроле надвижки и соединении ферм. Еще две критические точки на арочной ферме определялись как точка пересечения трех плоскостей.

Управление лазерным сканером производилось удаленно из ПО Leica Cyclone по протоколу TCP/IP. Такая схема НЛС позволила минимизировать физический контакт с прибором, а также получать и обрабатывать сканерные данные практически в онлайн-режиме.

Сбор сканерных данных при новой схеме нагрузки моста производился с разными параметрами измерений:

а) сканирование моста по горизонту (область 360°) и по вертикали (область 270°) с шагом 10 см на расстоянии 100 м, время сканирования ≈ 4 мин;

б) частичное сканирование области в зените $10 \times 10^\circ$ с шагом 1 мм на расстоянии 100 м (см. рис. 3), время сканирования ≈ 5 мин. Данные измерения выполнены для более точного определения вертикальных смещений конструкций свода арки моста;

в) сканирование и распознавание ориентирных точек O_1 и O_2 , определяемых точек V_n и V_b , время сканирования ≈ 5 мин.

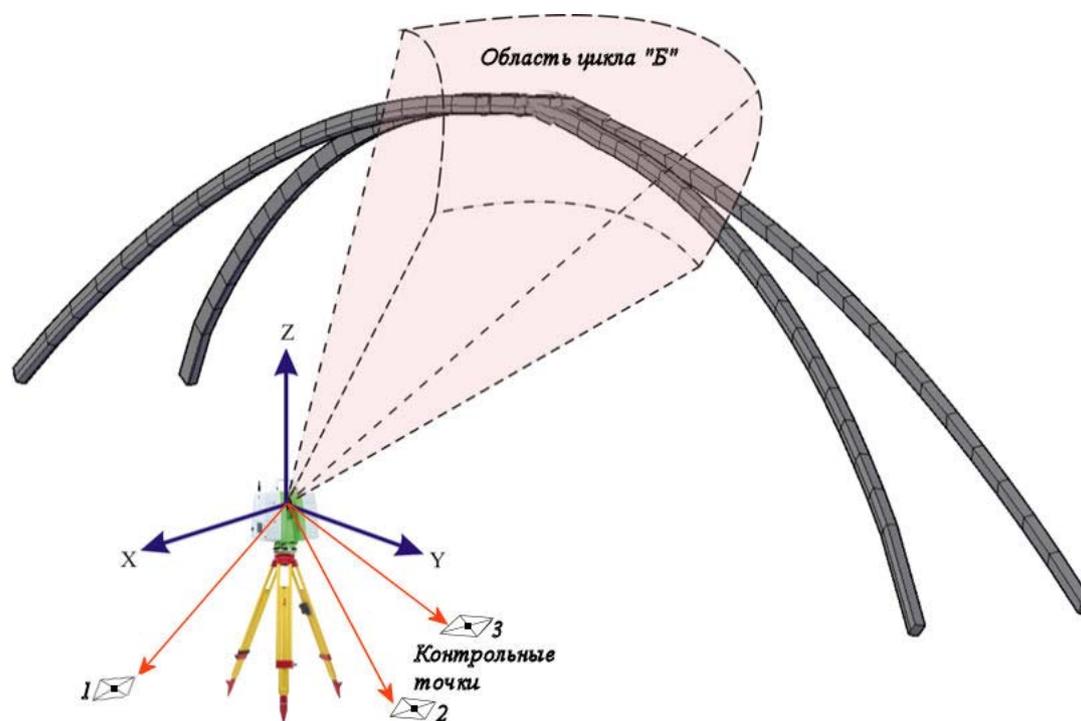


Рис. 3. Схема размещения НЛС, области сканирования и контрольных точек

Данная методика позволила проводить измерения в единой системе координат для всех геодезических измерений и определение интересующих недоступных геометрических параметров конструкций моста на любом этапе нагрузки.

Спутниковые геодезические измерения

Относительный метод спутниковых определений в статическом режиме позволяет достигать миллиметровой точности векторов базовых линий [16]. Использование режима RTK также зарекомендовало себя в качестве жизнеспособного инструмента для контроля прогибов большепролетных структур, поскольку позволяет обеспечивать сантиметровый уровень точности позиционирования с дискретностью до 10 Гц при расстоянии до ~ 20 км между ровером и базовой станцией (идеально подходит для длинных мостов) [17,18].

Поскольку организация полноценной мониторинговой системы в процессе динамических испытаний была невозможна, спутниковые геодезические измерения были использованы для качественного описания поведения моста и независимой оценки плановых результатов геодезических измерений.

В точках S_B и S_H , рядом с точками V_B и V_H были установлены спутниковые приемники фирмы Trimble R-8 (рис. 4). Приемники располагались в зоне пешеходного прохода, насколько возможно ближе к краю моста, чтобы минимизировать эффекты экранирования и многопутности спутниковых сигналов.



Рис. 4. Спутниковый приемник на точках S_H (слева) и S_B (справа)

Сеансы спутниковых наблюдений проводились независимо от программы динамических испытаний и накапливали измерения за весь период геодезических измерений с дискретностью 5 с.

Анализ результатов математической обработки

Данные о линейно-угловых и сканированных геодезических измерениях по радиосвязи передавались в центр управления, где они были анализированы, вычислялись относительные и средние перемещения.

Отражательные марки располагались на осветительных столбах только по краям моста, так как при нагружении моста в разных местах грузовики закрывали бы видимость на марки. Однако такое расположение при наклоне моста сильно влияло на положение осветительных столбов. Они наклонялись, поэтому горизонтальные смещения не учитывались при дальнейшей обработке. Расположение тахеометров на пролете моста вызывало изменение их положения при изменении нагрузки, поэтому после установки самосвалов по очередной схеме выполнялись привязка и ориентирование тахеометров на ориентирные точки O_1 и O_2 .

Обработка НЛС выполнялась в режиме реального времени в процессе измерений. В результате были получены такие уникальные геометрические параметры, как провисание вант моста относительно их замыкающей линии. Данная информация также помогла проанализировать их рабочее состояние.

Сводные результаты после каждой серии измерений передавались руководителю испытаний в виде схем деформации положения точек в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для большей наглядности эти схемы были дополнены схемой нагружения моста и представлены на рис. 5, 6.

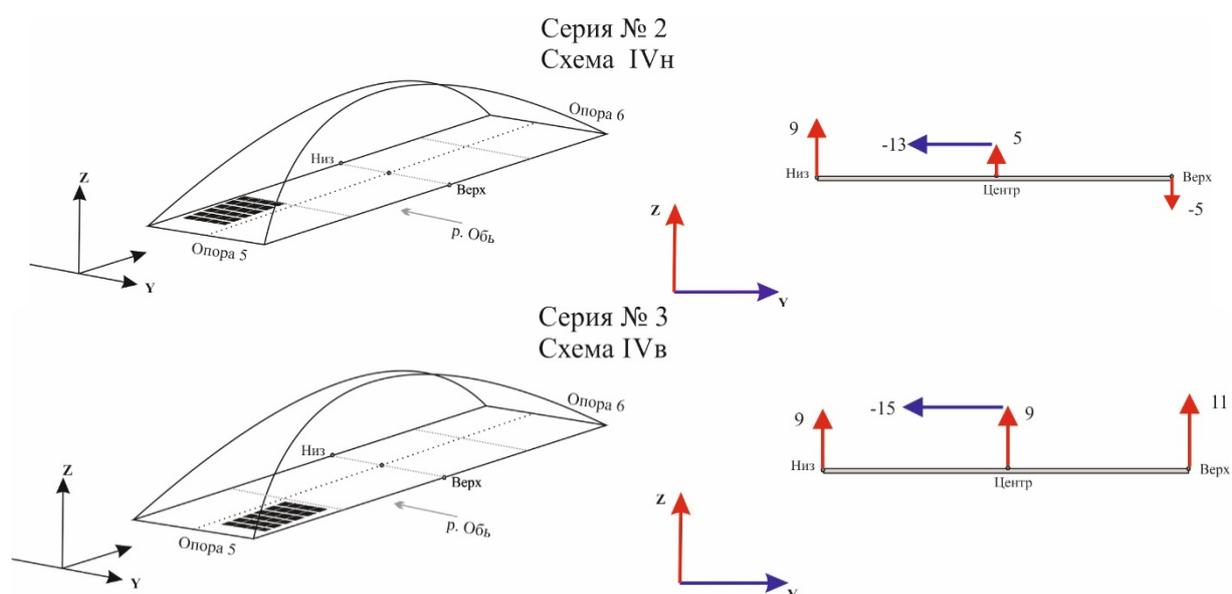


Рис. 5. Схемы нагрузки и деформаций в горизонтальной и вертикальной плоскостях (серии 2, 3)

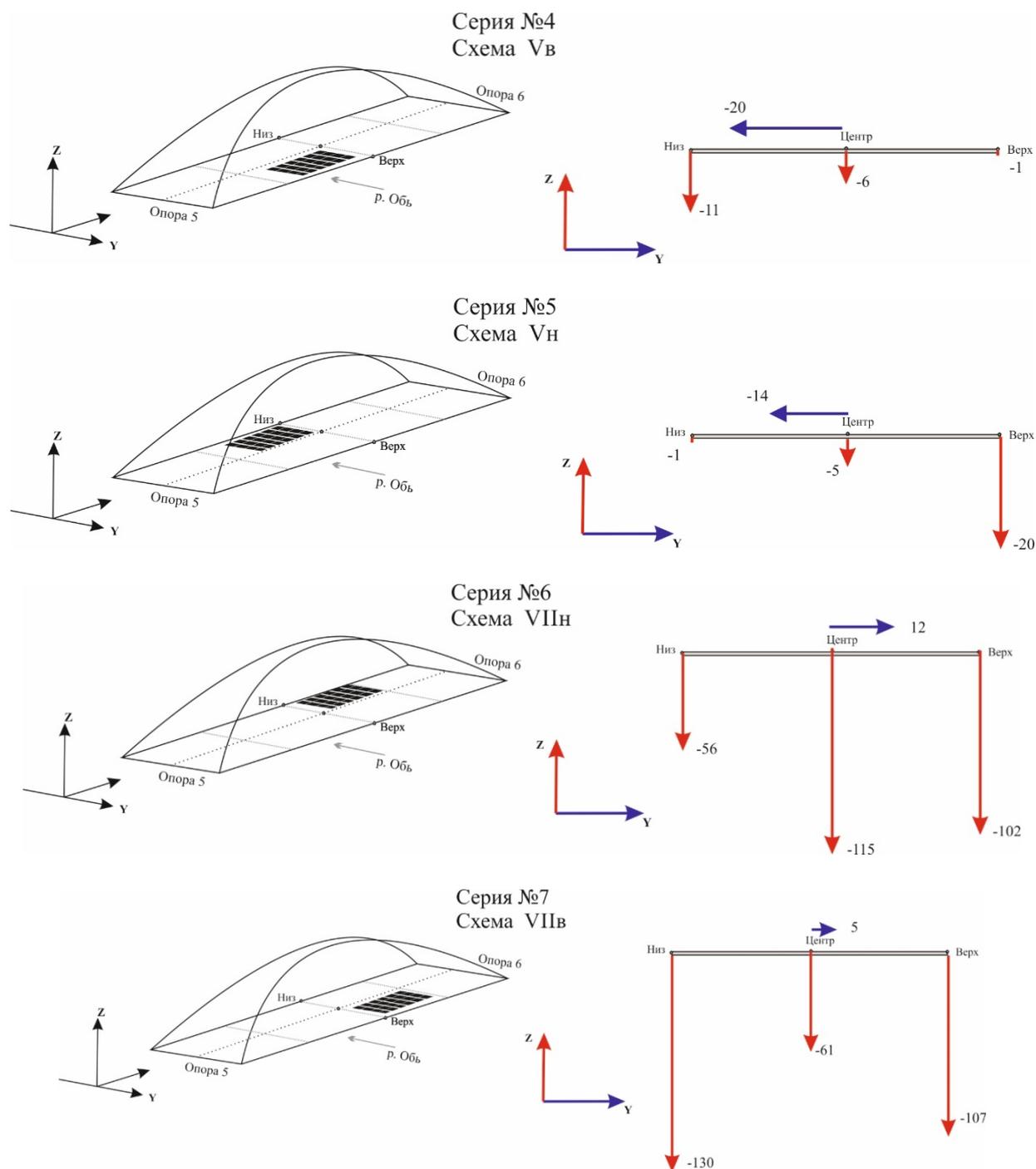


Рис. 6. Продолжение схемы нагрузки и деформаций в горизонтальной и вертикальной плоскостях (серии 4–7)

Спутниковые геодезические измерения обрабатывались в программном обеспечении Trimble Business Centre. Векторы базовых линий вычислены с использованием файлов быстрых точных эфемерид относительно постоянно действующих базовых станций NSKW и GSI (рис. 7).



Рис. 7. Схема измерения векторов от базовых станций

При такой схеме измерений и открытом радиогоризонте перемещения спутниковых приемников $S_{в}$ и $S_{н}$ должны были совпадать с геодезическими измерениями с точки $V_{ц}$. Однако наличие арки моста и двух рядов перекрещивающихся вант между приемниками $S_{в}$ и $S_{н}$ повлияли на результаты измерений (табл. 1). Определение высотных смещений для этих точек оказалось на порядок менее надежными, чем определение плановых координат. Смещения в горизонтальной плоскости почти в 50 % случаев для одной из точек ГНСС-измерений совпадали с линейно-угловыми измерениями, с точностью 2–7 мм.

Таблица 1

Параметры векторов ГНСС измерений

	$S_{низ}$					
	серия 3	серия 4	серия 5	серия 6	серия 7	серия 8
	0:18:30	0:17:00	0:20:00	0:18:00	0:20:00	0:19:30
Восток Y	6254,612	6254,608	6254,618	6254,597	6254,594	6254,598
Север X	-1351,172	-1351,178	-1351,179	-1351,168	-1351,175	-1 351,154
Отметка	81,245	81,313	81,243	81,187	81,131	81,195

Окончание табл. 1

Ошибки вектора:						
$\sigma \Delta$ Восток Y	0,004	0,004	0,003	0,005	0,004	0,004
$\sigma \Delta$ Север X	0,005	0,004	0,005	0,009	0,008	0,007
σ Превышение	0,033	0,029	0,044	0,038	0,028	0,045
Смещения:						
dY	0,000	0,004	-0,006	0,015	0,018	0,014
dX	-0,003	0,003	0,004	-0,007	0,000	-0,021
dH	0,046	-0,022	0,048	0,104	0,160	0,096
$S_{\text{верх}}$						
	серия 3	серия 4	серия 5	серия 6	серия 7	серия 8
	0:18:30	0:16:00	0:20:00	0:12:00	0:20:30	0:21:00
Восток Y	6269,967	6269,966	6269,960	6269,942	6269,941	6269,931
Север X	-1380,080	-1380,083	-1380,083	-1380,093	-1380,074	-1380,061
Отметка	81,211	81,228	81,230	81,091	81,111	81,321
Ошибки вектора:						
$\sigma \Delta$ Восток Y	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005
$\sigma \Delta$ Север X	0,008	0,006	0,005	0,008	0,007	0,006
σ Превышение	0,045	0,030	0,026	0,037	0,028	0,047
Смещения:						
dY	-0,006	-0,005	0,001	0,001	0,020	0,030
dX	0,009	0,012	0,012	0,022	0,003	-0,010
dH	-0,034	-0,051	-0,053	0,086	0,066	-0,144

Сводные результаты геодезических измерений различными методиками приведены в табл. 2. В табл. 2 колонки 11 и 12 (dY , мм) – это пересчитанные в систему координат моста (см. рис. 1 и 5) смещения точек ГНСС-измерений по оси Y. Сравнение смещений dY для центральной точки моста из геодезических измерений (колонка 9) и верхней и нижней точек ГНСС-измерений (колонки 11 и 12) показывает, что иногда смещение верхней точки ГНСС-измерений коррелирует со смещением средней точки, иногда смещение нижней точки коррелирует со смещением центральной точки. А иногда оба решения для точек ГНСС-измерений не совпадают с геодезическими измерениями.

Таблица 2

Усредненные смещения из геодезических и ГНСС-измерений

Номер серии	Схема	Время измерений		Нижняя точка (столб)		Верхняя точка (столб)		Средняя точка ($V_{\text{ц}}$)		ГНСС	
		начало	конец	dY , мм	dZ , мм	dY , мм	dZ , мм	dY , мм	dZ , мм	dY , мм	dY , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	IV _Н	12:07	12:30	+15	9	+18	-5	-13	5		
3	IV _В	12:46	13:05	+20	9	+22	11	-15	9	-11	+3

Номер серии	Схема	Время измерений		Нижняя точка (столб)		Верхняя точка (столб)		Средняя точка ($V_{ц}$)		ГНСС	
		начало	конец	dY , мм	dZ , мм	dY , мм	dZ , мм	dY , мм	dZ , мм	dY S_b	dY S_n
4	VВ	13:09	13:25	-22	-11	-17	-1	-20	-6	-13	-5
5	VН	13:35	13:55	-31	-1	-7	-20	-14	-5	-12	-7
	0	14:30	17:00	Перерыв, (техники и движения не было)							
6	VIIН	17:15	17:45	+19	-56	23	-115	+12	-102	-22	+17
7	VIIВ	17:59	18:20	+25	-130	+24	-61	+5	-107	-20	-18
8	0	19:20	19:40	0	-9	0	-5	+2	-7	+32	+25

Выводы

Анализ литературы по статическим испытаниям арочно-вантовых мостов показал, что использованная авторами методика совместных измерений электронными тахеометрами, лазерным сканером и ГНСС-приемниками была применена впервые.

Несмотря на то, что геодезические измерения при испытаниях моста выполнялись на подвижном основании, были получены достоверные результаты по высотному положению контрольных точек. Расхождения определения высот контрольных точек, полученных с точек стояния электронных тахеометров T_1 и T_2 , не превышали 5 мм при проектных значениях деформаций (25–150 мм).

В проекте испытаний не требовалось определять смещения контрольных точек в плане (составляющая dY), однако для точек, закрепленных по центральной осевой линии моста призмами 360° , достаточно достоверно определены и горизонтальные смещения. Расхождения в определении этих смещений геодезическими методами не превышали 8 мм. Совпадение со спутниковыми определениями координат этих же точек в 50 % случаев не превышает значений 2–7 мм, однако прямое сравнение этих результатов некорректно, так как геодезические измерения выполнялись на подвижном основании.

Эксперимент по применению спутниковых измерений в режиме постобработки при испытаниях арочно-вантового моста показал, что существенным ограничением этого метода являются срывы циклов и эффект многопутности, вызванные конструкцией моста. Для мостов такой конструкции необходимо изменить схему расположения приемников и организовать измерения в режиме реального времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 46.13330.2012. Мосты и трубы. – М., 2012.
2. Сырков А. В. Приемочные испытания внеклассного моста через Кольский залив в Мурманске // Транспорт Российской Федерации. – 2005. – № 1. – С. 46–47.

3. Nauzika Kovács, Balázs Kövesdi, László Duna, Bence Takács. Test of the Rákóczi Danube Bridge in Budapest [Электронный ресурс] // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 156. – P. 191–198. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.286>.
4. World-record-breaking 343m-high // *Reporter. The Magazine of Leica Geosystems*. – No. 49. – P. 4–7.
5. Антонов П. Мост через пролив Босфор Восточный – русское чудо 21-го века // *Reporter. Периодическое издание Leica Geosystems*. – № 63. – С. 12–13. – Русская версия.
6. Sedek M., Serwa A. Development of new system for detection of bridges construction defects using terrestrial laser remote sensing technology // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. – 2016. – No. 19. – P. 275–283.
7. Jauregui D. V., White K. R. 11 – Bridge inspection using virtual reality and photogrammetry // *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering / edited by Gongkang Fu*. Woodhead Publishing, *Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures*, 2005. – P. 216–246. – <https://doi.org/10.1533/9781845690953.216>.
8. Ященко А. И., Евстафьев О. В., Крейненброк Дж. В. Мониторинг деформаций висячего моста с использованием технологий ГЛОНАСС/GPS // *Геопрофи*. – 2010. – № 6. – С. 15–19.
9. Федосеев Ю. Е. Егорченкова Е. А. Требования к геодезической информации при мониторинге деформационных процессов мостовых сооружений // *Инженерные изыскания*. – 2010. – № 12. – с. 50–57.
10. Брынь М. Я., Никитчин А. А., Толстов Е. Г. Геодезический мониторинг объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта спутниковыми методами // *Транспорт Российской Федерации*. – 2010. – № 4 (29). – С. 58–62.
11. Mosbeh R. Kaloop, Hui Lib. Sensitivity and analysis GPS signals based bridge damage using GPS observations and wavelet transform [Электронный ресурс] // *Measurement*. – 2011. – Vol. 44, Issue 5. – P. 927–937. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.02.008>.
12. Ting-Hua Yi, Hong-Nan Lia, Ming Gub. Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge [Электронный ресурс] // *Measurement*. – 2013. – Vol. 46, Issue 1. – P. 420–432. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.018>.
13. Mohamed T. Elnabwy, Mosbeh R. Kaloop, Emad Elbeltagi. Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique [Электронный ресурс] // *Measurement*. – 2013. – Vol. 46, Issue 10. – P. 4282–4292. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.014>.
14. Fanis Moschas, Stathis Stiros. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer // *Engineering Structures*. – 2011. – Vol. 33, Issue 1. – P. 10–17. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.013>
15. Pasawat Tipyotha. Geodetic Monitoring Solutions for large infrastructure projects, An example from Cable-Stayed Bridge Health Monitoring in Korea // *Proceedings MALAYSIA GEOSPATIAL FORUM 2012 «Geospatial Technology: Digital Impetus to Economic Transformation» (6–7 March 2012)*. – Holiday Inn Melaka, 2012.
16. Brown C. J., Roberts G. W., Meng X. Developments in the use of GPS for bridge monitoring // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*. – Sept. 2006. – P. 117–119.
17. Roberts G. W., Meng X., Dodson A. H. The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges // *10th International Symposium on Deformation Measurements «Deformation Measurements and Analysis» (March 2001)*. – Orange, California, USA, 2011. – P. 268–275.

18. Duff K., Hyzak M., Tucker D. Real time deformation monitoring with GPS: Capabilities and Limitations // SPIE: Smart Structures and Materials. – March 1998. – P. 387–395.
19. Real-time bridge health-monitoring for management / E. Aktan, F. N. Catbas, M. Pervizpour, E. Kulcu, K. Grimmelman, R. Barrish and X. Qin // Paper for 2nd Workshop on Advanced Technologies in Urban Earthquake Disaster Mitigation. – Kyoto, July 11–13, 2000.
20. Yamada H., Katsuchi H., Kitagawa M. Field Measurement of Wind Property at Ohnaruto Bridge and the Akashi Kaikyo Bridge // Proc. Of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges. – 2000. – P. 196–203.
21. Monitoring system of the Akashi Kaikyo Bridge / S. Kashima, S. Okano, M. Takeguchi, K. Mori // Proc. Of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges. – 2000. – P. 119–126.
22. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий / М. Я. Брынь, Е. Г. Толстов, А. А. Никитчин, Б. Резник, А. И. Яценко, О. В. Евстафьев, В. А. Кучумов // Изв. Петербургского гос. ун-та путей сообщения. – 2009. – № 2 (19). – С. 120–128.
23. Roberts G. W., Meng X., Dodson A. Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges // Journal of Surveying Engineering. – 2004. – Vol. 130 (2). – P. 65–72.

Получено 04.07.2018

© В. А. Середович, А. В. Середович, А. В. Иванов,
А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, 2018

COMBINED METHOD FOR DETERMINING OF THE BUGHRIN BRIDGE DEFORMATIONS DURING ITS TESTS

Vladimir A. Seredovich

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya St., Novosibirsk, 630008, Russia, Ph. D., Professor, e-mail: v.seredovich@list.ru

Alexander V. Seredovich

Scientific Research Institute of Oil Gas "Neftegasproekt", 70, Mel'nikajte St., Tyumen, 625027, Russia, Ph. D., Head of the Laser Scanning Group, e-mail: seredovichav@nipingr.ru

Andrey V. Ivanov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering and Mining Geodesy, phone: (383)343-29-55, e-mail: geodata1000@gmail.com

Andrei A. Sholomitskii

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department of Engineering and Mining Geodesy, phone: (383)343-29-55, e-mail: sholomitskij@mail.ru

Elena K. Lagutina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering and Mining Geodesy, phone: (383)343-29-55, e-mail: e.k.lagutina@ssga.ru

The article considers various methods of geodetic measurements for testing bridges. It shows the development of combined geodetic measurement method that includes geodetic measurements performed by robotic total stations and a laser scanner for points on a bridge bearing girder, the critical points of which were not available for direct geodetic measurements. The measurement data, after each load series, were transferred to the control center for processing and analysis. Despite the installation of total station on a movable base, the proposed method allowed determining with high accuracy the deformations of the roadway and the bearing beam in the vertical plane. The experiment with the use of satellite measurements showed the shortcomings of the applied measurement scheme and the greater dependence on satellite constellation location in relation to the screening bridge cable grid. Analysis of the literature on bridge tests showed that the technique used by the authors for joint measurements by robotic total stations, laser scanners and GNSS receivers was used for the first time.

Key words: bridge tests, deformation, geodetic measurements, laser scanning, satellite measurements, analysis.

REFERENCES

1. SP 46.13330.2012. (2012). Bridges and pipes. Moscow [in Russian].
2. Syrkov, A. V. (2005). Acceptance tests of a non-class bridge across the Kola Bay in Murmansk. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 1, 46–47 [in Russian].
3. Nauzika Kovács, Balázs Kövesdi, László Duna, Bence Takács. (2016). Test of the Rákóczi Danube Bridge in Budapest. *Procedia Engineering*, 156, 191–198. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.286>
4. World-record-breaking 343 m-high. (n. d.). *Reporter, The Magazine of Leica Geosystems*, No. 49, 4–7.
5. Antonov, P. (n. d.). Bridge over the Bosphorus Strait East – Russian miracle of the 21st century. *Reporter, The Magazine of Leica Geosystems*, No. 63, 12–13 [in Russian].
6. Sedek, M., & Serwa, A. (2016). Development of new system for detection of bridges construction defects using terrestrial laser remote sensing technology. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 19, 275–283.
7. Jauregui, D. V., & White, K. R. (2005). 11– Bridge inspection using virtual reality and photogrammetry. In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Fu. Gongkang (Ed.) (pp. 216–246). Woodhead Publishing, Inspection and Monitoring Techniques for Bridges and Civil Structures. Retrieved from <https://doi.org/10.1533/9781845690953.216>.
8. Yashchenko, A. I., Evstaf'ev, O. V., & Kreynenbrok, Dzh. V. (2010). Monitoring of deformation of a suspension bridge using GLONASS / GPS technology. *Geoprofi [Geoprofi]*, 6, 15–19 [in Russian].
9. Fedoseev, Yu. E., & Egorchenkova, E. A. (2010). Requirements for geodesic information when monitoring deformation processes of bridge structures. *Inzhenernye izyskaniya [Engineering Surveys]*, 12, 50–57 [in Russian].
10. Bryn, M. Ya., Nikitchin, A. A., & Tolstov, E. G. (2010). Geodesic monitoring of infrastructure of railway transport using satellite methods. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 4(29), 58–62 [in Russian].
11. Mosbeh R. Kaloop, & Hui Lib. (2011). Sensitivity and analysis GPS signals based bridge damage using GPS observations and wavelet transform. *Measurement*, 44(5), 927–937. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.02.008>.
12. Ting-Hua Yi, Hong-Nan Lia, & Ming Gub. (2013). Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge. *Measurement*, 46(1), 420–432. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.07.018>.

13. Mohamed T. Elnabwy, Mosbeh R. Kaloop, & Emad Elbeltagi. (2013). Talkha steel highway bridge monitoring and movement identification using RTK-GPS technique. *Measurement*, 46(10), 4282–4292. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.014>.
14. Fanis Moschas, & Stathis Stiros. (2011). Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer. *Engineering Structures*, 33(1), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.013>.
15. Pasawat Tipyotha (2012). Geodetic Monitoring Solutions for large infrastructure projects, An example from Cable-Stayed Bridge Health Monitoring in Korea. In *Proceedings Malaysia Geospatial Forum 2012: Geospatial Technology: Digital Impetus to Economic Transformation, 6–7 March 2012*. Holiday Inn Melaka.
16. Brown, C. J., Roberts, G. W., & Meng, X. (2006). Developments in the use of GPS for bridge monitoring. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering* (pp. 117–119).
17. Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. H. (2001). The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to Monitor the Deflections of Large Bridges. In *10th International Symposium on Deformation Measurements: Deformation Measurements and Analysis, March 2001* (pp. 268–275). Orange, California, USA.
18. Duff, K., Hyzak, M., & Tucker, D. (1998). Real time deformation monitoring with GPS: Capabilities and Limitations. In *SPIE: Smart Structures and Materials, March 1998* (pp. 387–395).
19. Aktan, E., Catbas, F. N., Pervizpour, M., Kulcu, E., Grimmelman, K., Barrish, R., & Qin, X. (2000). Real –time bridge health-monitoring for management. *Paper for 2nd Workshop on Advanced Technologies in Urban Earthquake Disaster Mitigation, Kyoto, July 11–13, 2000*.
20. Yamada, H., Katsuchi, H., & Kitagawa, M. (2000). Field Measurement of Wind Property at Ohnaruto Bridge and the Akashi Kaikyo Bridge. *Proceedings of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges* (pp. 196–203).
21. Kashima, S., Okano, S., Takeguchi M., & Mori, K. (2000). Monitoring system of the Akashi Kaikyo Bridge. *Proceedings of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges* (pp. 119–126).
22. Bryn, M. Ya., Tolstov, E. G., Nikitchin, A. A., Reznik, B., Yaschenko, A. I., Evstafyev, O. V., & Kuchumov, V. A. (2009). Geodetic monitoring of cable-stayed bridge deformations based on satellite technology. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2(19), 120–128 [in Russian].
23. Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. (2004). Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges. *Journal of Surveying Engineering*, 130(2), 65–72.

Received 04.07.2018

© V. A. Seredovich, A. V. Seredovich, A. V. Ivanov,
A. A. Sholomitskii, E. K. Lagutina, 2018

УДК 551.2/.3

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ЗОНИРОВАНИЕ – ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Александр Николаевич Соловицкий

Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии и географии, тел. (384)258-01-66, e-mail: san.mdig@mail.ru

В традиционных технологиях геодинамических исследований управление развитием геодезических построений на геодинамических полигонах обычно проводится с учетом экономических, технических или технологических факторов. Разработанная теория управления развитием геодезических построений на геодинамических полигонах в рамках геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений не только исключает этот подход, но и учитывает требования геодинамической безопасности. В указанном мониторинге автором предлагается оценивать уровень геодинамической безопасности методом функционального зонирования, а также координировать развитие геодезических построений. Основным отличием предложенной теории является соответствие территориального, временного и методического развития указанных построений от степени опасности развития деформаций блоков земной коры и возможного риска проявления в них геодинамических явлений. Такой подход обеспечивает не только расширение использования геодезической информации при интерпретации геодинамических исследований, но и получение новых аспектов ее применения при построении геодинамических полигонов.

Ключевые слова: геодезические построения, блок земной коры, геодинамический полигон, ранг, геодинамические явления, функциональное зонирование.

Введение

Создание геодинамического полигона (ГДП) – достаточно изученная проблема в отечественной и зарубежной литературе [1–4]. Обширен спектр проводимых на них исследований и решаемых задач [1–23]. Перечислить всех ученых, занимающихся этой проблемой в этом и прошлом веке, невозможно, так как список будет очень громоздким. Для краткости следует отметить вклад организаций и вузов: Центрального научно-исследовательского института геодезии и картографии, Института физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук (РАН); Горного института Кольского научного центра РАН; Института горного дела Уральского отделения РАН, Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного РАН, Московского государственного университета геодезии и картографии; Сибирского государственного университета геосистем и технологий, Пермского государственного научно-исследовательского университета и др. Указанный вклад – это не только научные труды и руководства, но и нормативные издания [24–26]. Основная проблема создания геодинамического полигона связана со сбором, обработкой, интерпретацией

и анализом регистрируемой информации. Успешное решение этой проблемы привело к возникновению другой проблемы – управления развитием. Эта проблема полностью не разработана и не отражена достаточно в научной литературе [1, 3–5, 12, 15–19, 22, 27]. Рассмотрим эти несовершенства подробнее. С одной стороны, налицо развитие точности, оперативности и автоматизации приборной базы. С другой стороны, в традиционных технологиях отсутствует однозначный критерий развития, что сдерживает решение указанной проблемы. Кроме этого, в них не разработаны новые модели управления развитием, учитывающие требования геодинамической безопасности. Автором предлагается частное решение этой проблемы в рамках геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры (ГМНДСЗК). В указанном мониторинге уровень геодинамической безопасности автором предлагается оценивать методом функционального зонирования, в рамках которого устанавливается степень опасности развития напряженно-деформированного состояния (НДС) блоков земной коры и возможный риск проявления геодинамических явлений (ГДЯ) [27].

Методы и результаты

По степени опасности развития НДС блоки земной коры автором предлагается подразделять на четыре группы (класса). Установление степени опасности развития деформаций блока земной коры предложено осуществлять по величине изменений во времени их динамических параметров (изменения во времени деформаций блоков земной коры и соответствующие изменения во времени напряжений и потенциальной энергии) (табл. 1).

Таблица 1

Степень опасности развития деформаций блока земной коры в зависимости от изменения во времени динамических параметров

Степень опасности	Величина динамических параметров
I геодинамически неактивный блок земной коры (ГНАБ ЗК)	Изменения во времени компонентов деформаций менее $3 \cdot 10^{-6}$ в год
II геодинамически активный блок земной коры (ГАБ ЗК)	Изменения во времени компонентов деформаций более $3 \cdot 10^{-6}$ в год
III ГАБ ЗК, в котором формируется очаг геодинамического явления (ФО ГДЯ)	Изменения во времени компонентов деформаций от $15 \cdot 10^{-6}$ до $22,4 \cdot 10^{-6}$ в год
IV ГАБ ЗК, в котором сформирован очаг геодинамического явления (О ГДЯ) или произошло проявление ГДЯ	Изменения во времени компонентов деформаций свыше $22,4 \cdot 10^{-6}$ в год

Величины изменений во времени динамических параметров блока земной коры для установления III и IV степени опасности получены с учетом результатов исследований Кольского научного центра РАН, М. А. Садовского и ряда других авторов, которые обосновали, что проявление геодинамического явления при очаге в глубине массива горных пород возможно при плотности энергии не менее $12 \text{ кг} \cdot \text{м}/\text{м}^3$. Поэтому при установлении III степени опасности минимальное значение изменений во времени компонентов деформаций принято в размере 0,67 от указанной величины.

Обратная связь системы управления развитием ГДП начинает действовать, когда установлена II степень опасности развития деформаций блока земной коры. В этом случае необходим контроль соседних блоков земной коры такого же ранга, как исследуемый на предмет геодинамической активности, критерием которой является следующее неравенство [27]:

$$Ve_{ij}[t-t_0] \geq 3Ve_n[t-t_0], \quad (1)$$

где $Ve_{ij}[t-t_0]$ – скорость деформации исследуемого блока земной коры в год; $Ve_n[t-t_0]$ – скорость деформации земной коры, не приводящая к проявлению геодинамических явлений, равная $1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.

Основой критерия (1) являются результаты исследований, проведенные учеными Института физики Земли, которые установили, что медленные скорости деформаций земной коры менее $1 \cdot 10^{-6}$ в год не могут приводить к образованию разломов и проявлению ГДЯ.

При этом наблюдается развитие ГДП в пространстве или территориальное. При расширении геодинамической активности за границы блоков одного ранга r потребуются многоуровневые построения ГДП, опирающиеся на действие следующего критерия [27]:

$$\left. \begin{aligned} Ve_{ij}[t-t_0](r) &\geq 3Ve_n[t-t_0] \\ Ve_{ij}[t-t_0](r+1) &\geq 3Ve_n[t-t_0] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Чтобы результаты проводимых исследований были однозначны, автором предлагается типовая схема построений ГДП в виде структурной пространственной модели для каждого исследуемого блока земной коры как элементарной ячейки сети. Опыт применения пространственных фигур в геодезии мало освещен, особенно при проведении прикладных геодинамических исследований [27–29]. Мобильные пункты (МП) такой модели имеют определенную схему закрепления (рисунок). Здесь можно выделить их разные уровни – 1 и 2, 3, 4. При этом МП 1 закрепляется в вершине блока земной коры, а 2, 3, 4 – в узлах пересечения разломов. Стабильные пункты (не менее четырех) закладываются в условно-стабильном блоке.

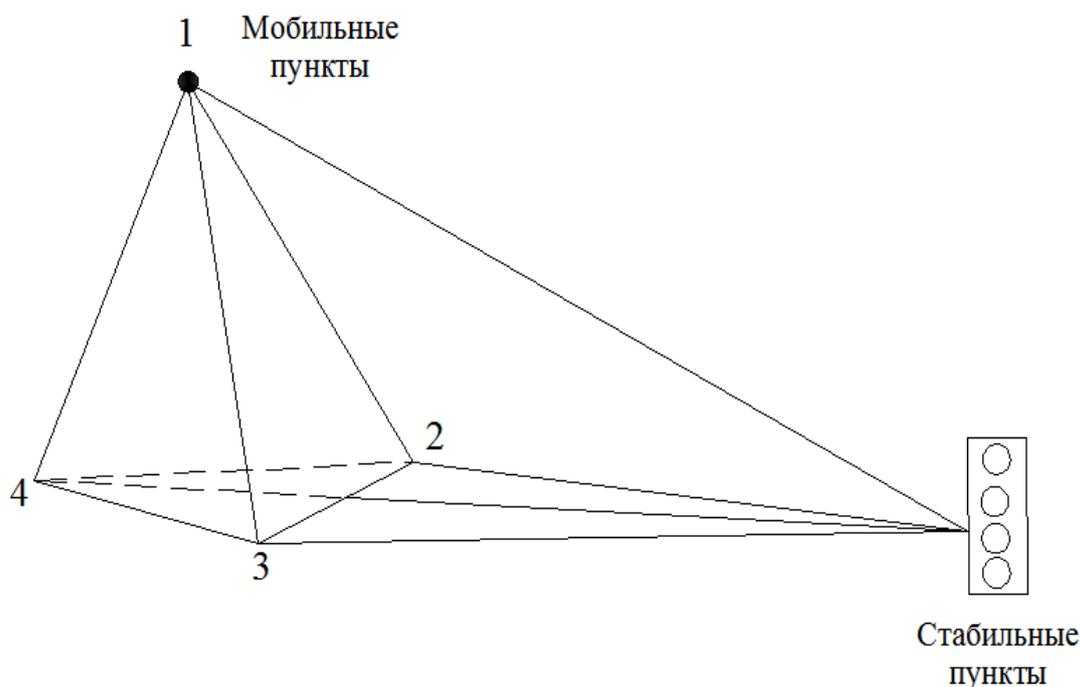


Рис. 1. Схема элементарной ячейки геодезических построений

При установлении III степени опасности развития деформаций блока земной коры происходит развитие ГДП во времени, то есть изменяется частота опроса

$$T \geq 3mD[t - t_0] / Ve_{ij}[t - t_0], \quad (3)$$

где $Ve_{ij}[t - t_0]$ – скорость деформации исследуемого блока земной коры в год; $mD[t - t_0] = (m^2D[t] + m^2[t_0])^{0,5}$; $mD[t], mD[t_0]$ – средние квадратические погрешности определения компонентов изменения во времени деформации $\Delta D[t - t_0]$ в эпохи t и t_0 .

Теоретической значимостью указанной методологии (1)–(3) является учет зависимости развития геодезических построений на ГДП от степени опасности развития деформаций блоков земной коры, а практическая значимость заключается в территориальном (1), (2) и временном (3) их развитии. Такой подход обеспечивает поэтапность построений ГДП, что свидетельствует об экономической эффективности. При этом территориальное развитие выполняется на основе предложенной автором типовой схемы (см. рисунок), что упрощает технологию проектирования и реализации. Обоснованность теоретической и практической значимости использования этого метода функционального зонирования в качестве инструмента управления развитием ГДП подтверждается предложенными автором критериями (1)–(3).

Другой метод функционального зонирования, обеспечивающий оценку возможного риска проявления ГДЯ, включает экспертный анализ степени опас-

ности O и степени уязвимости $У$, и количественно выражается коэффициентом риска P [27, 28, 30]

$$P = OУ. \quad (4)$$

Установление степени возможного риска проявления ГДЯ разрушительного характера по величине P :

- малая – не более 0,15 (ГМНДСЗК функционирует успешно);
- умеренная – от 0,15 до 0,3 (ГМНДСЗК функционирует с небольшими отклонениями);
- большая – от 0,3 до 0,5 (ГМНДСЗК функционирует эпизодически);
- критическая – свыше 0,5 (ГМНДСЗК не функционирует).

Анализ выполненных результатов исследований свидетельствует о необходимости совершенствования и развития ГДП при степени возможного риска проявления ГДЯ разрушительного характера $P > 0,3$.

Теоретической значимостью использования этого метода функционального зонирования в качестве инструмента управления развитием ГДП является зависимость степени возможного риска от полноты функционирования такого полигона, а практическая значимость заключается в оценке возможного ущерба от проявления ГДЯ. Такой подход обосновывает необходимость построений ГДП и регистрации кинематики блоков земной коры, что свидетельствует о гибкости проведения исследований и соответствующей экономической эффективности.

Кроме этого, выполнение критериев (1) и (2) потребует не только развития и совершенствования приборной базы, но и программ и методик проведения повторных высокоточных наблюдений на ГДП, а также их математической обработки. Требования к точности определения координат и высот мобильных пунктов на ГДП приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели точности определения координат и высот МП

Ранг блока земной коры	СКП определения координат и высот, мм
II	±38
III	±9,5
IV	±4,1
V	±3
VI	±0,7

Результаты исследований, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что СКП определения координат и высот в отдельных случаях превышают нормативные [25] и достижение указанных точностей – сложная научно-техническая задача.

Заключение

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы.

1. Типовая схема построений ГДП в виде структурной пространственной модели для каждого исследуемого блока земной коры содержит значительное количество избыточных измерений, является жесткой, обеспечивает не только одинаковую точность определения координат, но и поэтапность развития, что свидетельствует о ее экономической эффективности.

2. Разработанный метод управления развитием ГДП на основе функционального зонирования блоков земной коры учитывает уровень геодинамической безопасности, что является кардинальным отличием от традиционных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серебрякова Л. И. О методическом руководстве по геодинамическим исследованиям в системе Росреестра // Геодезия и картография. – 2013. – № 10. – С. 45–50.
2. Результаты высокоточных спутниковых измерений в сети Северобайкальского ГДП / Л. И. Серебрякова, В. П. Горобец, Р. А. Сермягин, А. В. Басманов, В. В. Буртовой, И. Ф. Насретдинов, К. Е. Фролов // Физическая геодезия. Научно-технический сборник ЦНИИГАиК. – М. : Научный мир, 2013. – С. 122–134.
3. Ященко В. Р. Геодезические измерения в районах интенсивного движения земной коры // Геодезия и картография. – 2015. – № 9. – С. 48–53.
4. Деформации земной поверхности на активных границах литосферных плит. – М. : ЦНИИГАиК, 1995. – 100 с.
5. Савиных В. П., Певнев А. К., Ямбаев Х. К. Теория упругой отдачи, дилатансия, геодезия – прогноз // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 29–34.
6. Маркузе Ю. И., Ямбаев Х. К. Структурная схема мониторинга и алгоритм анализа деформаций земной коры по результатам спутниковых измерений на пунктах региональных референцных сетей // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 6. – С. 30–36.
7. Кузьмин Ю. О. Геодинамический мониторинг объектов недропользования // Гео-Сибирь-2006 : Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2006 г.). – Новосибирск, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 33–43.
8. Грунин А. Г., Кузьмин Ю. О., Фаттахов Е. А. Проблемные вопросы проектирования геодинамических полигонов на месторождениях УВ // Маркшейдерский вестник. – 2014. – № 6. – С. 24–31.
9. Певнев А. К. О новых возможностях геодезического метода в решении проблемы прогноза землетрясений // Геоинжиниринг. – 2013. – № 1 (17). – С. 40–43.
10. Кафтан В. И. Место геодезической геодинамики в системе знаний о Земле // Кадастр недвижимости. – 2012. – № 2 (27). – С. 43–46.
11. Современные движения земной коры (СДЗК) на Камчатке / В. Е. Левин, В. Ф. Бахтияров, Н. Н. Титков и др. // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 17–37.
12. Карпик А. П., Каленицкий А. И., Соловицкий А. Н. Новый этап развития геодезии – переход к изучению деформаций блоков земной коры в районах освоения месторождений // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 3–9.
13. Карпик А. П., Каленицкий А. И., Соловицкий А. Н. Технология изучения изменений во времени деформаций блоков земной коры при освоении месторождений Кузбасса // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 3–11.

14. Каленицкий А. И., Ким Э. Л. О необходимости комплексного применения гравиметрии и геодезических методов при мониторинге природной и техногенной геодинамики на месторождениях углеводородов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 15–23.
15. Мазуров Б. Т. Анализ геодезических измерений с учетом динамики объектов мониторинга // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 18–22.
16. Колмогоров В. Г., Дударев В. И. Состояние проблемы комплексного изучения современной геодинамики Сибири в конце двадцатого столетия // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 4 (28). – С. 3–12.
17. Есиков Н. П. Современные движения земной поверхности с позиций теории деформаций. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1991. – 226 с.
18. Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В. Периодические вертикальные смещения по геодезическим данным и упругие параметры земной коры // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 20–26.
19. Козырев А. А., Семенова И. Э., Аветисян И. М. Особенности напряженно-деформированного состояния бортов протяженной в плане карьерной выемки в тектонически напряженном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 7. – С. 47–53.
20. Козырев А. А., Семенова И. Э., Земцовский А. В. Анализ условий реализации горного удара на Расвумчоррском руднике 14 февраля 2012 г. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 4. – С. 28–33.
21. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов недропользования / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина, Б. Т. Мазуров // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 26–39.
22. Кашников Ю. А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М. : Недра, 2007. – 467 с.
23. Опарин В. Н., Потапов В. П., Танайно А. С. К проблеме информационного обеспечения мониторинга геодинамических процессов в условиях интенсивного недропользования в Кузнецком бассейне // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 5. – С. 40–66.
24. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах : метод. руководство. – М. : ЦНИИГАиК, 1985. – 113 с.
25. Основные положения о геодезической сети Российской Федерации. ГКИНП (ГНТА)-01-006-03. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 6 с.
26. Инструкция по созданию наблюдательных станций и производству инструментальных наблюдений за процессами сдвижения земной поверхности при разработке нефтяных месторождений в регионе ВКМКС / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, Н. Ю. Гуляев, В. Г. Букин, С. В. Гришко. – Пермь : ПерГТУ, 2003. – 56 с.
27. Соловицкий А. Н. Интегральный метод контроля напряженного состояния блочного массива горных пород / под ред. П. В. Егорова. – Кемерово : ГУ КузГТУ, 2003. – 260 с.
28. Соловицкий А. Н. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений: геодезические построения // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 81–89.
29. Solovitskiy A. Dynamic models of deformation of crustal blocks in the area of development of coal deposits – the basis of the information security of their development [Электронный ресурс] // 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. – September, 2016. – Режим доступа : <http://www.atlantispress.com/php/pub.php?publication=coal-16>.

30. Соловицкий А. Н. Оценка риска проявления геодинамических явлений при освоении месторождения // ГЕО-Сибирь-2010: Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 2. – С. 32–36.

Получено 30.10.2018

© А. Н. Соловицкий, 2018

FUNCTIONAL ZONING – A TOOL FOR MANAGING THE DEVELOPMENT OF GEODYNAMIC POLYGON IN THE STUDY OF THE EARTH CRUST GEODYNAMICS

Aleksandr N. Solowitskiy

Kemerovo State University, 6, Krasnaya St., Kemerovo, 650000, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Geology and Geography, phone: (384)258-01-66, e-mail: san.mdig@mail.ru

In traditional geodynamic research technologies, the management of geodetic constructions development at geodynamic sites is usually carried out taking into account economic, technical or technological factors. The developed theory of the management of geodesic constructions development at geodynamic test sites within the framework of geodetic monitoring of the stress-strain state of the earth's crust in areas of coal deposits development not only excludes this approach, but also takes into account the geodynamic safety requirements. In this monitoring, the author proposes not only to assess the level of geodynamic safety by the method of functional zoning, but also to coordinate the development of geodetic constructions. The main difference of the proposed theory is the correspondence of the territorial, temporal and methodological development of these constructions to the danger degree of the earth's crust blocks deformation and the possible risk of geodynamic phenomena in them. Such an approach provides not only an extended using of geodesic information when interpreting geodynamic studies, but also obtaining new aspects of its use in constructing geodynamic polygons.

Key words: geodetic constructions, the blocks of the Earth's crust, geodynamic polygon, rank, geodynamic phenomena, functional zoning.

REFERENCES

1. Serebryakova, L. I. (2013). The methodological guide for the geodynamic research in the system of Federal registration service. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 10, 45–50 [in Russian].
2. Serebryakova, L. I., Gorobets, V. P., Sermyagin, R. A., Basmanov, A. V., Burtova, V. V., Nasretdinov, I. F., & Frolov K. E. (2013). The results of high-precision satellite measurements in the network of the Severobaikalsky GDP. In *Fizicheskaya geodeziya. Nauchno-tekhnicheskij sbornik CNIIGAiK [Physical Geodesy. Scientific and Technical Collection TsNIIGiK]* (pp. 122–134). Moscow: Nauchnyj mir Publ. [in Russian].
3. Yashchenko, V. R. (2015). Geodetic measurements in areas of intensive movement of the earth's crust. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 9, 48–53 [in Russian].
4. *Deformacii zemnoj poverhnosti na aktivnyh granicah litosfernyh plit [Deformations of the earth's surface at the active boundaries of lithospheric plates]*. (1995). Moscow: TsNIIGAIK Publ., 100 p. [in Russian].
5. Savinykh, V. P., Pevnev, A. K., & Yambaev, Kh. K. (2013). Theory of elastic recoil, dilatancy, geodesy – forecast. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 29–34 [in Russian].

6. Markuze, Yu. I., Yambaev, Kh. K. (2014). Structural monitoring scheme and algorithm for analyzing the deformation of the earth's crust from satellite measurements at points of regional reference networks. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 6, 30–36 [in Russian].
7. Kuzmin, Yu. O. (2006). Geodynamic monitoring of subsoil use objects. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2006: T. 3, ch. 1 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2006: Vol. 3, Part 1]* (pp. 33–43). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. Grunin, A. G., Kuzmin, Yu. O., & Fattakhov, E. A. (2014). Problematic issues of designing geodynamic polygons at hydrocarbon fields. *Markshejderskij vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 6, 24–31 [in Russian].
9. Pevnev, A. K. (2013). On new possibilities of the geodesic method in solving the problem of earthquake prediction. *Geoinzhiniring [Geoengineering]*, 1(17), 40–43 [in Russian].
10. Kaftan, V. I. (2012). Place geodesic geodynamics in the system of knowledge about the Earth. *Kadastr nedvizhimosti [Real Estate Cadastre]*, 2(27), 43–46 [in Russian].
11. Levin, V. E., Bakhtiyarov, V. F. & Titkov, N. N. (2014). Modern movements of the earth's crust (ULTD) in Kamchatka. *Fizika Zemli [Earth Physics]*, 6, 17–37 [in Russian].
12. Karpik, A. P., Kalenitskiy, A. I., & Solovitskiy, A. N. (2013). A new stage of development of geodesy – the transition to the study of the deformation of crustal blocks in the areas of development of deposits. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 3(23), 3–9 [in Russian].
13. Karpik, A. P., Kalenitskiy, A. I., & Solovitskiy, A. N. (2013). Technology of studying changes in the time of deformations of the blocks of the earth's crust during the development of Kuzbass fields. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 4(24), 3–11 [in Russian].
14. Kalenitskiy, A. I., & Kim, E. L. (2015). On the need for an integrated application of gravimetry and geodesic methods for monitoring natural and man-made geodynamics in hydrocarbon fields. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 15–23 [in Russian].
15. Mazurov, B. T. (2012). Analysis of geodetic measurements, taking into account the dynamics of monitoring objects. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 18–22 [in Russian].
16. Kolmogorov, V. G., & Dudarev, V. I. (2014). Status of the complex study of modern geodynamics of Siberia at the end of the twentieth century. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 4(28), 3–12 [in Russian].
17. Esikov, N. P. (1991). *Sovremennyye dvizheniya zemnoj poverhnosti s pozicij teorii deformacij [Modern movements of the earth's surface from the standpoint of the theory of deformations]*. Novosibirsk: Science. Siberian Branch, 226 p. [in Russian].
18. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., & Timofeev, A. V. (2015). Periodic vertical displacements according to geodesic data and the elastic parameter of the earth's crust. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5/S, 20–26 [in Russian].
19. Kozyrev, A. A., Semenova, I. E., & Avetisyan, I. M. (2013). Peculiarities of the stress-strain state of the career-extended excavation in a tectonically intense array. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' [Mining Informational Analytical Bulletin]*, 7, 47–53 [in Russian].
20. Kozyrev, A. A., Semenova, I. E., & Zemtsovsky, A. V. (2013). Analysis of the conditions for the implementation of a mining strike at the Rasvumchorr mine on February 14, 2012. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' [Mining Informational Analytical Bulletin]*, 4, 28–33 [in Russian].
21. Panzhin, A. A., Sashurin, A. D., Panzhina, N. A., & Mazurov, B. T. (2016). Geodetic support of geodynamic monitoring of subsoil use objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 26–39 [in Russian].

22. Kashnikov, Yu. A. (2007). *Mekhanika gornyh porod pri razrabotke mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya [Mechanics of rocks in the development of hydrocarbon deposits]*. Moscow: Nedra Publ., 467 p. [in Russian].
23. Oparin, V. N., Potapov, V. P., & Tanaino, A. S. (2006). To the problem of information support of monitoring geodynamic processes in conditions of intensive subsoil use in the Kuznetsk basin. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and Technical Problems of Development Mineral]*, 5, 40–66 [in Russian].
24. *Geodezicheskie metody izucheniya deformacij zemnoj kory na geodinamicheskikh poligonah [Geodetic methods for studying the deformations of the earth's crust at geodynamic polygons]*. (1985). Moscow: TsNIIGAIK Publ., 113 p. [in Russian].
25. SCINP (GNTA)-01-006-03. (2004). Basic provisions on the geodetic network of the Russian Federation. Moscow: TsNIIGAIK Publ., 6 p. [in Russian].
26. Kashnikov, Yu. A., Ashikhmin, S. G., Gulyaev, N. Yu., Bukin, V. G., & Grishko, S. V. (2003). *Instrukciya po sozdaniyu nablyudatel'nyh stancij i proizvodstvu instrumental'nyh nablyudenij za processami sdvizheniya zemnoj poverhnosti pri razrabotke neftyanyh mestorozhdenij v regione VKMKS [Instructions for the creation of observation stations and the production of instrumental observations of the processes of earth surface displacement during the development of oil fields in the VKMKS region]*. Perm: PerGTU, 56 p. [in Russian].
27. Solovitsky, A. N. (2003). *Integral'nyj metod kontrolya napryazhennogo sostoyaniya blochnogo massiva gornyh porod [The integral method of controlling the stress state of a block rock massif]*. P. V. Egorov (Ed.). Kemerovo: GU KuzGTU Publ., 260 p. [in Russian].
28. Solovitsky, A. N. (2017). Geodesic monitoring of the stress-strain state of the earth's crust in the areas of development of coal deposits: geodetic construction. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 81–89 [in Russian].
29. Solovitskiy, A. (2016). Dynamic models of deformation of crustal blocks in the area of development of coal deposits - the basis of the information security of their development. *8th Russian-Chinese Symposium. Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*. Retrieved from <http://www.atlantispress.com/php/pub.php?publication=coal-16>.
30. Solovitsky, A. N. (2010). Risk assessment of geodynamic phenomena during field development. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2010: T. 1, ch. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2010: Vol. 1, Part 2]* (pp. 32–36). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

Received 30.10.2018

© A. N. Solovitskiy, 2018

УДК 528.482

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕВАТОРОВ ВЫСОТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СИСТЕМЫ «ТУРБОАГРЕГАТ – ФУНДАМЕНТ – ОСНОВАНИЕ»

Георгий Афанасьевич Уставич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: ystavich@mail.ru

Виктор Александрович Скрипников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: v.a.skripnikov@ssga.ru

Надежда Михайловна Рябова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: ryabovanadezhda@mail.ru

Маргарита Александровна Скрипникова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: m.a.skripnikova@ssga.ru

В статье рассматриваются способы передачи отметок на монтажные горизонты при монтаже оборудования на примере определения тепловых деформаций системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО). Основное внимание уделено вопросам обеспечения требуемой точности измерений. Определение рассматриваемых в статье тепловых деформаций обусловлено необходимостью расчета по данным геодезических измерений значений преднамеренных (заранее устанавливаемых) расцентровок линии валопровода для их последующей установки при монтаже или ремонте турбоагрегата. Для передачи отметок предлагается несколько методик измерений с использованием высокоточного тахеометра и нивелира. В статье приведены результаты экспериментальных измерений, выполненных по предлагаемым методикам. Применение методик измерений с использованием высокоточного тахеометра и нивелира при определении тепловых деформаций системы ТФО позволит значительно упростить процесс передачи отметок, уменьшит влияние основных источников ошибок измерений и при необходимости выполнить автоматизированный мониторинг изменения длин колонн с выбранным интервалом времени.

Ключевые слова: тепловые деформации, элеваторы высот, высокоточный нивелир, высокоточный тахеометр, автоматизированная система мониторинга.

Введение

Задача передачи отметок на технологические (монтажные) горизонты возникает при строительстве инженерных сооружений и технологического оборудования. Например, при строительстве высотных сооружений или монтаже

оборудования реакторного или турбинного отделений АЭС возникает необходимость непрерывно производить передачу отметки с горизонта на горизонт от исходного репера. При этом в зависимости от условий и стадии монтажа должны применяться различные способы такой передачи. Особенно это различие существенно между стадией строительства и монтажа оборудования машинного и реакторного залов и стадией их расконсервации с последующим продолжением монтажа. В первом случае производится поэтапное строительство монтажных горизонтов с передачей соответствующих отметок. Во втором случае, когда строительство монтажных горизонтов уже выполнено и прошел значительный промежуток времени, передачу отметок (для контроля и восстановления высотной сети) затрудняет технологическое оборудование. С учетом этого обстоятельства возникает необходимость в разработке схем передачи отметок с применением элеваторов высот при значительной разности отметок монтажных горизонтов, которые в зависимости от условий на монтажной площадке в данный момент времени позволяют производить передачу высот (отметок) или определять изменение высот точек при наличии значительного количества оборудования, строительных конструкций и влияния перепадов температур.

К настоящему времени разработаны следующие схемы элеваторов высот, основанные на применении следующих видов высокоточных геодезических измерений в различном их сочетании:

- высокоточное геометрическое нивелирование короткими лучами;
- геометрическое нивелирование и стальная компарированная рулетка (инварная проволока или лента);
- постоянно подвешенные инварные стержни;
- высокоточное тригонометрическое нивелирование короткими лучами;
- измерение вертикального расстояния высокоточным тахеометром.

Необходимо отметить, что передача отметок может производиться как внутри возводимого инженерного сооружения, так и вне его.

В связи с применением в геодезическом производстве автоматизированных высокоточных тахеометров появилась возможность производить передачу отметок на верхнюю плиту турбоагрегата и выполнять детальный автоматизированный мониторинг тепловых деформаций системы ТФО.

Однако паспортная точность измерения расстояний недостаточна для достоверного вычисления тепловых деформаций системы ТФО. В связи с тем, что измерения выполняются без существенного изменения внешних условий иращения высот незначительны, следует предположить, что систематические ошибки измерений не будут оказывать существенного влияния на точность определения деформаций системы ТФО. Исходя из этого предположения, актуальной задачей является разработка методик определения тепловых деформаций системы ТФО с использованием элеваторов высот, которые позволят оценить полученные результаты по величине случайной составляющей ошибки измерений. Существующие, а также предлагаемые схемы создания элеваторов высот приведены на рис. 1.



Рис. 1. Схемы создания элеваторов высот

Основная часть

При наблюдении за деформациями системы «турбоагрегат – фундамент – основание» возникает задача определения тепловых деформаций верхнего строения фундамента (удлинение колонн), которое включает в себя колонны и верхний ростверк (верхняя плита).

Эти тепловые деформации возникают вследствие изменения длины колонн при пуске турбоагрегата и его останове [1, 2]. Величины тепловых деформаций для высоких фундаментов могут достигать 4,5–5,8 мм и эти данные используются для следующих монтажных операций:

- проверки расчетных величин удлинения колонн, обусловленных качеством их изоляции от расположенных рядом паропроводов;
- расчета и последующей установки преднамеренных расцентровок валопроводов турбоагрегатов при их монтаже или ремонте [1].

Для определения изменения длин колонн необходимо определять величины превышений (расстояния) между марками нижней плиты турбоагрегата и марками, установленными на верхней плите.

Рассмотрим схемы элеваторов высот для передачи отметок на верхнюю плиту турбоагрегата и рассчитаем ожидаемую при этом ошибку измерений с учетом максимального влияния перепада температур окружающего воздуха.

1. Передача отметки высокоточным геометрическим нивелированием короткими лучами. Схема передачи отметки при помощи геометрического нивелирования аналогична методике высокоточного нивелирования короткими лучами с той лишь разницей, что с целью уменьшения числа станций превышение между точками делается по возможности большим. При этом передача отметки может производиться при монтаже системы ТФО и при определении только тепловых деформаций при работе системы ТФО в режиме «останов – пуск – работа – останов».

Передача отметки при монтаже системы ТФО происходит в два этапа:

- на первом этапе производится передача отметки от глубинного до рабочего репера T (рис. 2), расположенного в районе фундамента турбоагрегата;
- на втором этапе производится передача отметки (превышения) от рабочего репера T на временный репер монтажного горизонта или марку M верхней плиты нивелированием с установкой реек на элементы строительных конструкций, например, ступы лестничного марша.

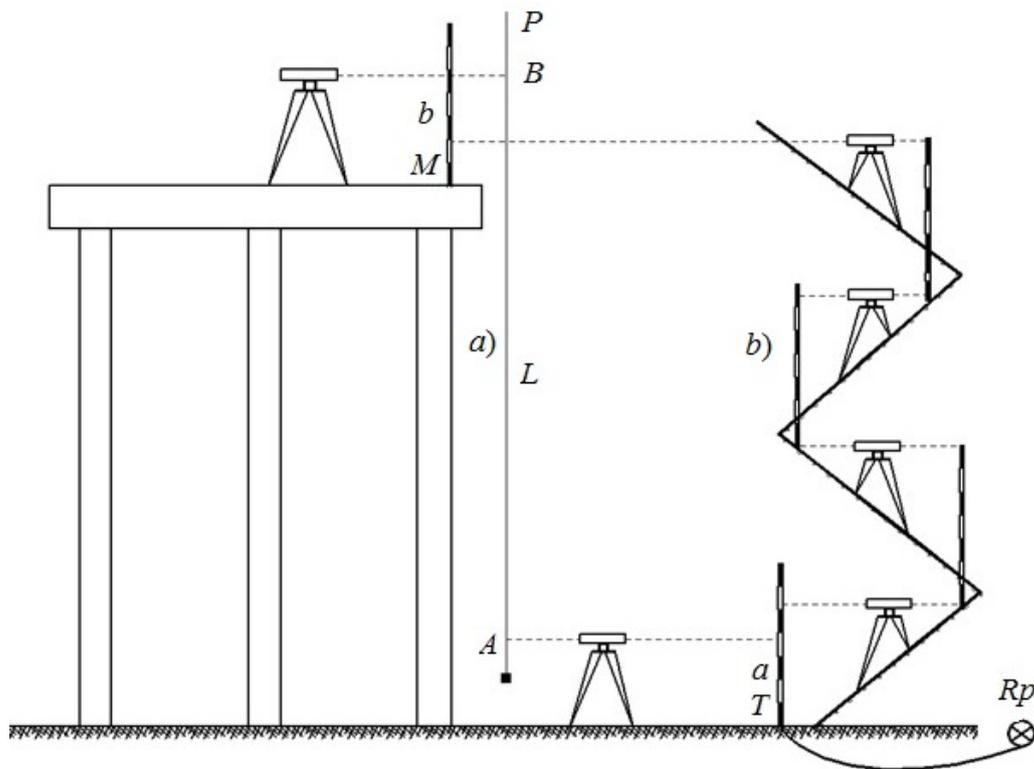


Рис. 2. Схема передачи отметки на верхнюю плиту двумя способами:

- a)* геометрическим нивелированием и стальной компарированной рулеткой;
- б)* геометрическим нивелированием Rp – глубинный репер; T – рабочий репер; a – отсчет по рейке; A – отсчет по рулетке; L – разность отсчетов по рулетке; M – марка; b – отсчет по рейке; B – отсчет по рулетке; P – рулетка

Передача отметки от глубинного до рабочего репера T производится по программе нивелирования 3-го разряда со средней квадратической ошибкой (СКО) определения превышения на станции не более $m_n = 0,50$ мм.

Передача отметки (превышения) от рабочего репера T на репер монтажного горизонта или марку M верхней плиты производится нивелированием короткими визирными лучами (длиной 5–10 м) с установкой реек на элементы строительных конструкций. При реализации данного способа измерение превышений (проложение хода) часто производится по железобетонной лестнице с последующей привязкой к реперу на монтажном горизонте или к марке на верхней плите. Также можно использовать элементы строительных конструкций, расположенных на разной высоте. Нивелирование выполняется по несимметричной программе взятия отсчетов по рейкам (ЗЗПП) при одном горизонте инструмента. Для передачи превышения потребуется 4–5 станций. После передачи отметки на репер монтажного горизонта или марку верхней плиты производится нивелирование строительных конструкций и всех марок верхней плиты с вычислением их высотных отметок.

Среднюю квадратическую ошибку передачи превышения можно вычислить по следующей формуле:

$$m_n = 0,5 \text{ мм} \sqrt{n}, \quad (1)$$

где n – число станций в нивелирном ходе.

Суммарная величина СКО передачи отметки от глубинного репера до репера на монтажном горизонте или марки на верхней плите не будет превышать 1,0–1,5 мм.

При испытаниях головных образцов турбоагрегатов, особенно мощностью 500–1 000 МВт, по заказу проектировщиков необходимо определять только тепловые деформации системы ТФО в следующих основных режимах: «монтаж – пуск – пусконаладочные испытания – работа», «останов – ремонт – пуск – работа» и «работа – останов – ремонт – пуск – работа». В зависимости от мощности турбоагрегата длительность переходных режимов (нагрев и остывание) составляет 5–8 суток. Для этого необходимо с определенной периодичностью [1] определять величину изменения длин колонн (тепловые деформации) от марок, установленных на нижней плите до марок верхней плиты. В этом случае СКО определения изменения длин колонн не должна превосходить 0,30–0,40 мм. Это обусловлено тем, что ошибка определения изменения длин колонн, равная 0,20 мм, приводит к изменению в установлении величины раскрытия полумуфт (по торцу) во время монтажа или ремонте роторов (линии валопровода) на величину 0,01 мм при допустимом значении этого раскрытия, равном 0,03 мм.

Для получения ошибки 0,30–0,40 мм в определении изменения длин колонн СКО измерения превышения на станции не должны превышать 0,20 мм. Для получения такой точности нивелирование должно выполняться по программе 2-го разряда.

Основным недостатком данной схемы передачи отметки является необходимость установки нивелира на 4-5 станциях на разных горизонтах. Кроме того, по мере монтажа оборудования, места установки штатива закрываются и требуется выбор новых мест для его установки, что часто является трудоемким в технологическом и организационном отношениях процессом.

2. Передача отметки стальной компарированной рулеткой (инварной проволокой или лентой) и высокоточным геометрическим нивелированием. Схема передачи отметки на монтажный горизонт инженерного сооружения при помощи геометрического нивелирования и стальной компарированной рулетки хорошо отработана.

Передача отметки на марки верхней плиты турбоагрегата при его возведении с помощью компарированной стальной рулетки и высокоточного нивелирования также производится в два этапа (см. рис. 2, а):

- передача отметки от глубинного репера на твердую точку T , расположенную в непосредственной близости от фундамента турбоагрегата;
- передача отметки на репер монтажного горизонта или марку M верхней плиты компарированной рулеткой.

Рассмотрим особенность применения стальной рулетки применительно к определению тепловых деформаций системы ТФО. Как известно, важным условием ее применения является необходимость введения поправок за влияние изменения температуры. Необходимо отметить, что применительно к исследованию тепловых деформаций колонн турбоагрегата нет необходимости компарировать каждый метр рулетки; компарируется по длине колонн только начальный и конечный метровые интервалы. Например, если высота колонн равна 7,20, 11,20 или 15,90 м, то компарируются, соответственно, интервалы (0–1 и 0–7–8 м), (0–1 и 0–11–12 м) и (0–1 и 0–16–17 м), включая и дециметровые.

Для передачи отметки от точки T на марку M верхней плиты рулетку P с натяжением 10 кг рекомендуется подвесить в трубе вдоль стальной колонны здания турбины, расположенной в непосредственной близости от турбоагрегата. В трубе также должен быть установлен и термометр. Тем самым будет создан элеватор высот. При взятии отсчетов по рулетке высокоточный нивелир вверху и внизу устанавливается на расстоянии 3–5 м от подвешенной рулетки и отсчет по ней производится с ошибкой 0,1 мм (оценивается миллиметровый интервал). При производстве отсчетов по рулетке на барабанчике микрометра устанавливается 50 делений, а по инварной рейке, установленной в точке T (марке нижней плиты), отсчет производится обычным способом.

Основной ошибкой измерений при передаче отметки на монтажный горизонт является ошибка, обусловленная влиянием температуры на рулетку.

Поправка Δ_t за разность температур при компарировании рулетки и при выполнении измерения вычисляется по известной формуле

$$\Delta_t = l\alpha(t - t_0), \quad (2)$$

где α – коэффициент термического расширения материала, из которого изготовлена рулетка.

Если принять СКО учета температуры рулетки, равную $m_t = 1$ °С, то величина ошибки в определении удлинения колонн при $L = 10$ м будет равна 0,12 мм.

Тогда суммарная величина СКО m_L определения изменения длины колонн будет равна

$$m_L = \sqrt{2m_p^2 + 2m_{рул}^2 + m_t^2 + 2m_1^2 + 2m_2^2}, \quad (3)$$

где m_p – СКО компарирования инварной рейки, равная 0,05 мм; $m_{рул}$ – СКО компарирования выбранных интервалов рулетки, равная 0,20 мм; m_t – СКО учета температуры рулетки, равная 0,12 мм; m_1 – СКО взятия отсчетов по рейкам, равная 0,05 мм; m_2 – СКО взятия отсчетов по рулетке, равная 0,10 мм.

Тогда суммарная величина СКО определения удлинения колонн (тепловых деформаций) данным способом не будет превосходить 0,30 мм.

Для контроля измерений и повышения их точности передачу отметки следует выполнить не менее трех раз.

Определение величины удлинения колонн данным способом значительно упростится в отношении учета температуры, если использовать инварную проволоку от базисного прибора БП-2 или инварные ленты (рабочий эталон 1-го разряда), применяемые в локальных поверочных схемах. Так как длина проволоки от базисного прибора БП-2 равна 24 м, то необходимо будет одну из ее отсчетных шкал закрепить на этой проволоке на расстоянии от нулевого деления, равном высоте фундамента турбоагрегата.

3. Применение постоянно подвешенных инварных стержней. Для определения величин удлинения колонн автором исследования [3] был разработан способ, основанный на использовании инварных стержней, которые подвешены рядом с колоннами (или одной колонной) постоянно между верхней и нижней плитами фундамента турбоагрегата. В данном способе величина изменения длин колонн (колонны) измеряется щупом между нижним торцом инварного стержня и маркой на нижней плите с ошибкой порядка 0,05–0,10 мм.

Наряду с достоинством способа, заключающимся в сравнительно небольшой ошибке измерений, имеются два существенных недостатка:

- чрезвычайно сложно расположить инварный стержень рядом с колонной из-за наличия технологического оборудования;
- высокая стоимость инварных стержней.

4. Применение тригонометрического нивелирования короткими лучами.

Появление в геодезическом производстве высокоточных электронных тахеометров, обеспечивающих СКО измерения углов наклона порядка 1,0–2,0" и расстояния до 250–300 м в безотражательном режиме 2,0–3,0 мм, способствует широкому их применению при выполнении высокоточного нивелирования тригонометрическим способом [4–14]. Данный способ нивелирования можно применить и при определении тепловых деформаций колонн фундамента тур-

боагрегата. Для выполнения измерений по определению теплового изменения длин колонн в точке A (рис. 3) на расстоянии, равном 1,5–1,7 высоты фундамента, устанавливается высокоточный тахеометр, например *Leika* TM30. После приведения тахеометра в рабочее положение зрительная труба при двух кругах сначала наводится на любой штрих O_2 инварной рейки, установленной на нижней марке A , и измеряется отрезок O_1O_2 , который является превышением $O_1O_2 = h_1$ относительно горизонтального положения визирной оси OO_1 . После этого зрительная труба наводится на штрих O_3 инварной рейки, установленной на марку верхней плиты, и измеряется превышение $h_2 = O_1O_3$ также относительно горизонтального положения визирной оси OO_1 .

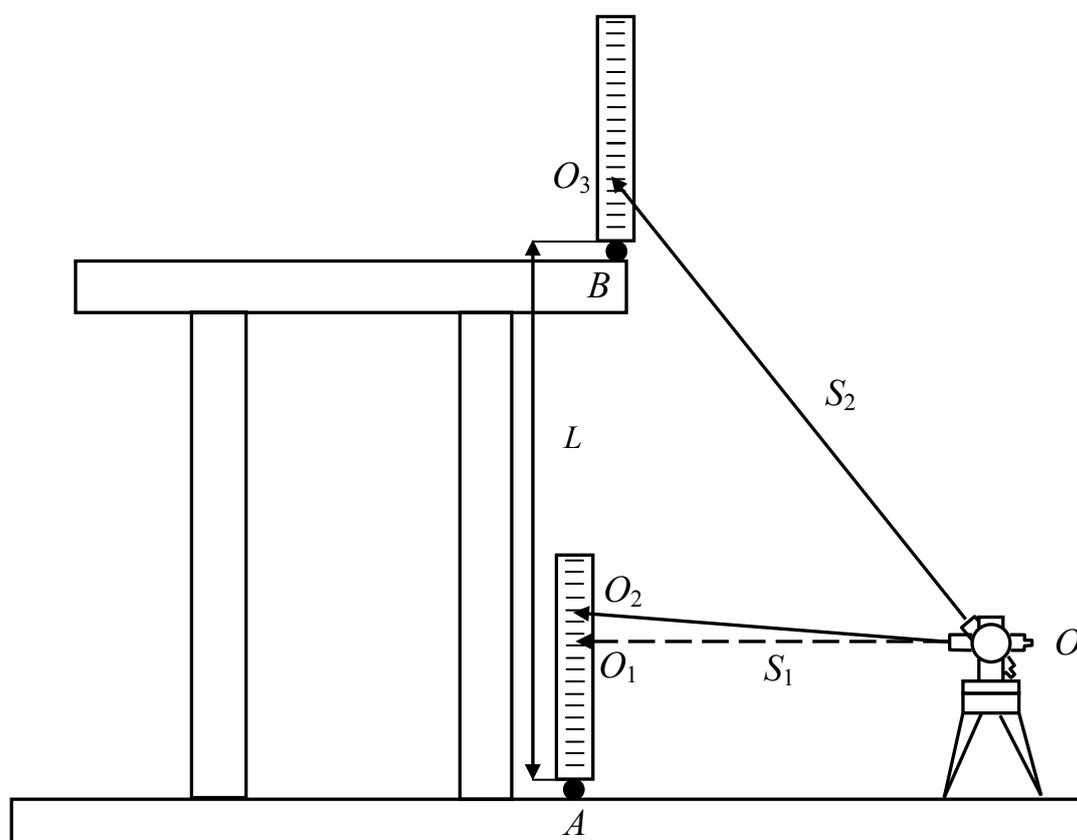


Рис. 3. Схема определения тепловых деформаций тригонометрическим нивелированием:

A, B – марки; O, O_1 – точки визирной линии; O_2, O_3 – штрихи инварной рейки; S_1, S_2 – измеряемые расстояния до инварной рейки; L – расстояние между марками

Из рис. 3 следует, что расстояние L между марками нижней и верхней плитами равно

$$L = AB = AO_1 + O_1O_3 - BO_3 = AO_1 + h_2 - BO_3, \quad (4)$$

а

$$AO_1 = AO_2 - O_1O_2 = AO_2 - h_1. \quad (5)$$

Обозначим: $AO_2 = l_1$ и $BO_3 = l_2$.

Тогда

$$L = AB = l_1 - h_1 + h_2 - l_2. \quad (6)$$

Суммарная величина СКО m_L определения изменения длины колонн будет равна

$$m_L = \sqrt{2m_l^2 + 2m_h^2}, \quad (7)$$

где m_l – СКО измерения отрезков l_1 и l_2 инварной рейки, равная 0,05 мм; m_h – СКО измерения превышений h_1 и h_2 .

Если принять ошибку измерения угла наклона высокоточным тахеометром, например, ТМ30, равной $m_v = 0,5''$ и расстояния $m_s = 0,50$ мм, то при $v = 10-15^\circ$ и $S = 15-20$ м будем иметь

$$m_h = \sqrt{\sin^2 v \cdot m_D^2 + \frac{D^2 \cdot \cos^2 v \cdot m_v^2}{\rho^2}} = 0,15 - 0,20 \text{ мм}. \quad (8)$$

Тогда суммарная величина СКО определения изменения длин колонн (тепловых деформаций) данным способом не будет превосходить 0,20–0,25 мм.

Для контроля измерений и повышения их точности передачу отметки следует выполнить не менее трех раз.

5. Передача отметки измерением вертикального расстояния. Для этого в непосредственной близости от колонн фундамента на нижней плите устанавливается высокоточный тахеометр (рис. 4). После приведения его в рабочее положение зрительная труба визируется на штрих O_2 инварной рейки, установленной на марку A нижней плиты, и измеряется превышение $h_1 = O_1O_2 = OO_2$ между осью O вращения зрительной трубы тахеометра и выбранным штрихом O_2 инварной рейки. Затем зрительная труба устанавливается вертикально с ошибкой порядка 20–30'' (при $S = 17$ м ошибка в измерении не будет превышать 0,02 мм), визируется на пятку инварной рейки, установленной на переходной точке B верхней плиты, и в безотражательном режиме измеряется расстояние $L = OB$ между осью O вращения зрительной трубы тахеометра и переходной точкой B , расположенной на верхней плите.

Завершающим этапом является измерение превышения $h_2 = BC$ по программе 1-го разряда между переходной точкой B и маркой C (марками) верхней плиты.

Из рис. 4 следует, что

$$L = AC = AB + BC = AO_2 - h_1 + L + h_2. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что не всегда имеется возможность установить тахеометр практически строго (в пределах 3–5 см) под пяткой инварной рейки. В этом случае измерения можно выполнить наклонным лучом.

Для этого тахеометр устанавливается не строго под пяткой рейки, а на расстоянии до 0,5–1,0 м от отвесной линии (рис. 5). После измерения расстояния D и угла наклона β на пятку рейки, установленную на верхней плите, а также превышения h_1 , вычисления производятся по формуле

$$L = AB = l_1 - D \sin \beta + h_2 = l_1 - h_1 + h_2. \quad (10)$$

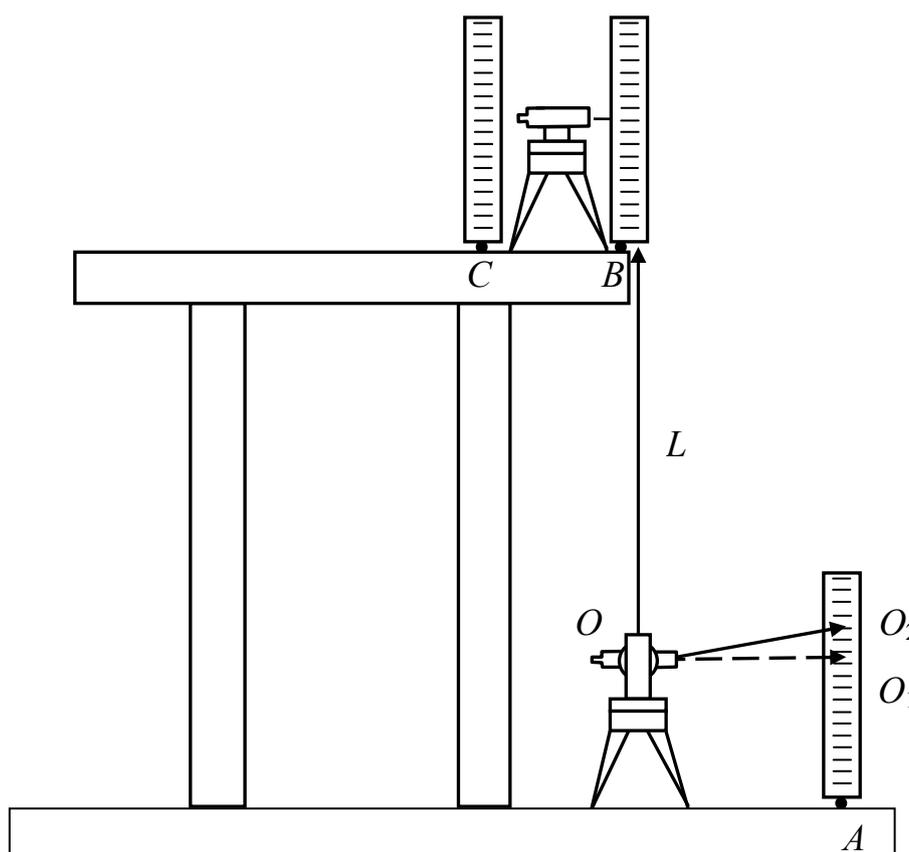


Рис. 4. Схема определения тепловых деформаций измерением расстояния тахеометром и геометрическим нивелированием:

A, B, C – марки; O, O_1 – точки визирной линии; O_2 – штрих инварной рейки

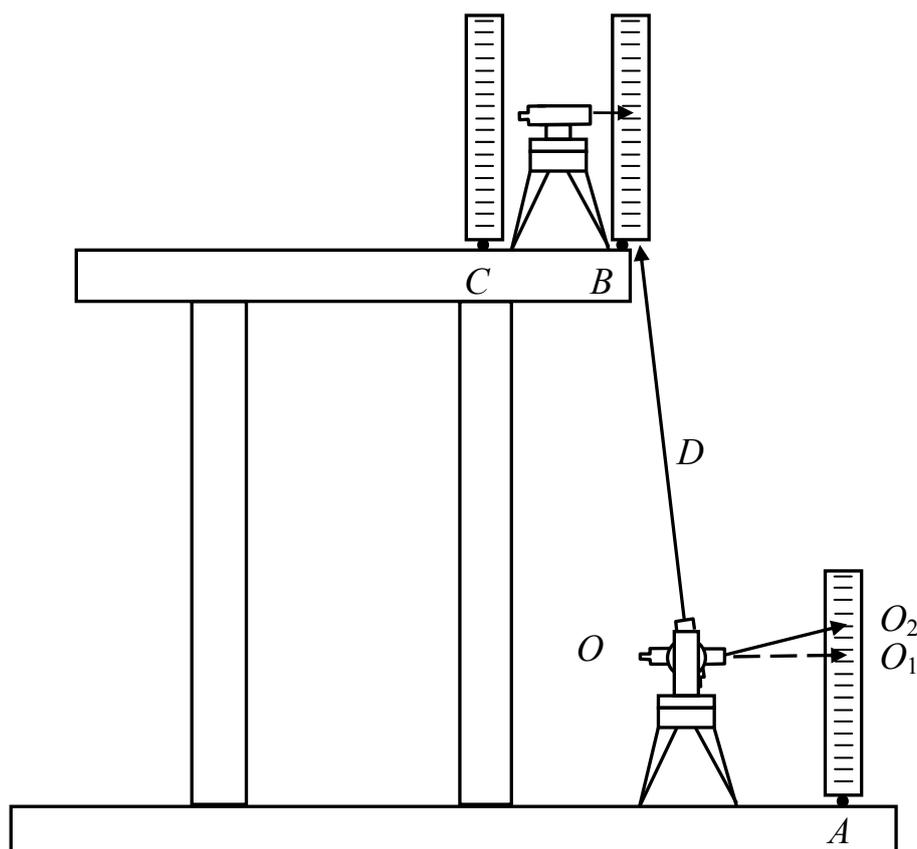


Рис. 5. Схема выполнения измерений со смещенной установкой тахеометра:

A, B, C – марки; O, O_1 – точки визирной линии; O_2 – штрих инварной рейки;
 D – измеряемое расстояние до инварной рейки

Величина ΔL_i изменения длины колонны из-за изменения режима работы системы ТФО в i -м цикле измерений вычисляется по формуле

$$\Delta L_i = L_1 - L_n, \quad (11)$$

где L_1 – длина колонны в первом (исходном) цикле измерений; L_n – длина колонны в последующих циклах измерений.

Рассмотренными выше способами определяется изменение длины ΔL_i только одной колонны фундамента. Изменение длин остальных колонн фундамента (их количество может достигать 24) производится высокоточным геометрическим нивелированием. Для этого дополнительно выполняется нивелирование осадочных марок верхней плиты, установленных над каждой колонной. Тогда величина изменения δL_i длин колонн в i -м цикле измерений вычисляется по формуле

$$\delta L_i = L_1 + \Delta h_k, \quad (12)$$

где L_1 – длина первой колонны в i -м цикле измерений; Δh_k – величина превышения между первой L_1 и k -й колонной в i -м цикле измерений.

Для определения точности измерения коротких, до 20 м (максимальная высота колонн фундамента турбоагрегата), расстояний D были выполнены исследования с применением высокоточных тахеометров *Leika* TM30 и *Leika* TCRP 1201+ с наведением на отражатель и в безотражательном режиме на пятку инварной рейки.

Расстояние D изменялось от 10 до 18 м. На каждой установке выполнялось по пятнадцать измерений. При выполнении исследований также определялся характер изменения значений измеренных расстояний (рис. 6, 7). Анализ графиков показывает, что измерения в безотражательном режиме для исследуемых тахеометров имеют более высокие амплитуды изменений отсчетов и, соответственно, более низкую точность. После восьмого наведения изменение отсчетов при наведении на отражатель не превышает точности отсчитывания.

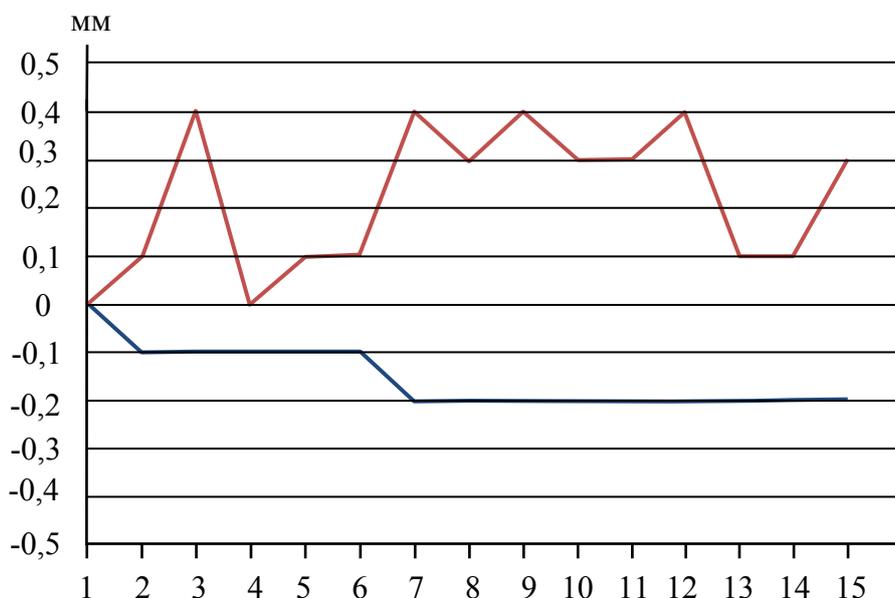


Рис. 6. График изменений значений расстояний, измеренных тахеометром TM30 при наведении на пятку рейки и на отражатель GMP104:

— наведение на пятку рейки; — наведение на отражатель GMP104

По результатам обработки измерений установлено, что СКО измерения расстояния тахеометром TM30 на отражатель GMP104 и пятку рейки равна, соответственно, 0,06 и 0,18 мм, а тахеометром TCRP 1201+, соответственно, 0,11 и 0,14 мм. Если принять ошибку измерения расстояния D высокоточными тахеометрами, равную $m_D = 0,10–0,15$ мм, превышений h_1 и h_2 , равную 0,10 мм (с учетом ошибок компарирования реек), то суммарная величина СКО m_L определения изменения длины колонн данным способом не будет превосходить 0,15–0,2 мм.

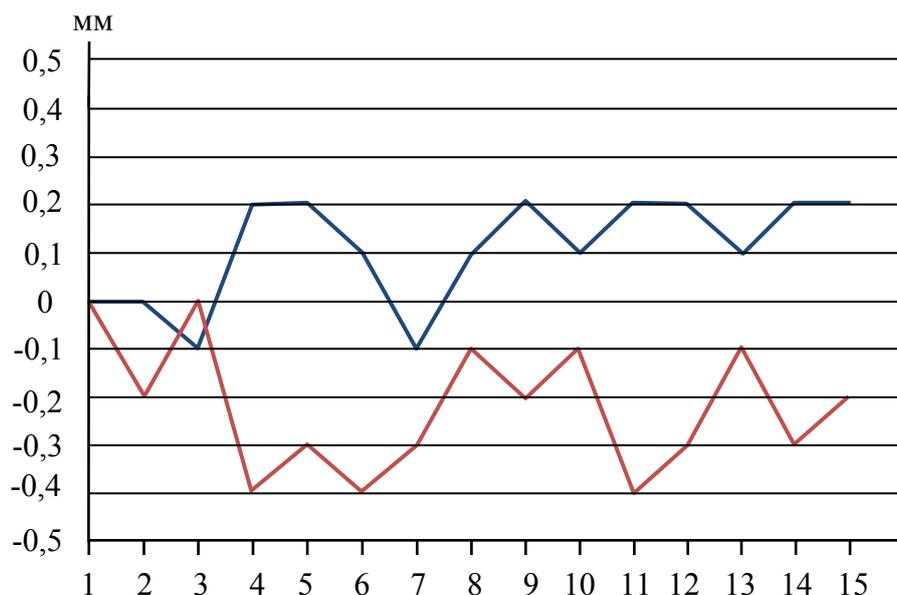


Рис. 7. График изменений значений расстояний, измеренных тахеометром TCRP 1201+ при наведении на пятку рейки и на отражатель GMP104:

— наведение на пятку рейки; — наведение на отражатель GMP104

Для контроля измерений расстояния L (см. рис. 4) и повышения его точности передачу отметки следует выполнять не менее трех раз.

Необходимо отметить, что в настоящее время определение величин тепловых деформаций производится с периодичностью, в основном, один раз в сутки. Длительность одного цикла измерений составляет 1,5–3,0 часа в зависимости от мощности турбоагрегата и конструктивных особенностей всей системы ТФО. Применение последнего способа измерений и высокоточного тахеометра TCRP 1201+ позволяет определять изменение длины колонны (расстояние D , см. рис. 5) за 3–5 секунд с любым интервалом времени. Кроме того, данный способ для целей суточного мониторинга определения величин теплового изменения длины колонны позволяет выполнять измерения с применением автоматизированной системы мониторинга, например, Leica GeoMoS. Для этого перед началом пуска (останова) турбоагрегата на нижней плите устанавливается тахеометр и с заданным интервалом времени по схеме, показанной на рис. 4, автоматически измеряется расстояние L . Так как тахеометр со штативом будет установлен стационарно на нижней плите фундамента турбоагрегата, то по разности измеренных расстояний L , будет определяться величина ΔL , которая и характеризует изменение длин колонн фундамента турбоагрегата вследствие его разогрева (остывания).

Необходимо отметить, что при разогреве фундамента возникает влияние турбулентности воздуха, которое приводит к уменьшению точности тригоно-

метрического нивелирования [15–20]. В связи с тем, что измеряемое расстояние L не превышает 20 м, величина возникающих ошибок будет незначительной.

Данную схему измерений с использованием пятки рейки или экрана можно применять и для передачи отметки на монтажные горизонты при строительстве высотных сооружений, например, многоэтажных жилых домов.

Заключение

Рассмотренные способы создания и применения элеваторов высот позволяют в зависимости от фактических условий монтажа или эксплуатации (ремонта) турбоагрегата выполнить определение тепловых деформаций системы ТФО и на основании полученных результатов дать рекомендации по установлению преднамеренных величин расцентровок роторов линии валопровода. Выполненные исследования показали, что применение методики многократных измерений на станции для исследуемых тахеометров позволяет выбрать такой интервал этих измерений, который будет иметь минимальные амплитуды изменения величин измеряемых расстояний и, следовательно, дает возможность получить максимальную точность. В связи с тем, что конструкции тахеометров разных фирм различаются, авторами предлагается выполнять исследования по определению интервалов из ряда измерений расстояний, имеющих максимальную точность, индивидуально для каждого типа прибора. При испытании головных образцов авторами рекомендуется выполнять мониторинг тепловых деформаций системы ТФО высокоточным тахеометром с применением автоматизированной системы ведения мониторинга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уставич Г. А., Жуков Б. Н., Малиновский А. Л. Исследование деформаций верхнего строения фундаментов турбоагрегатов // Геодезия и картография. – 1978. – № 9. – С. 34–37.
2. СО 153-34.21.322–2003. Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформаций зданий и сооружений строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – М., 2005.
3. Перепечкин А. А. Определение деформаций верхней плиты турбоагрегатах мощностью 800 МВт Славянской ГРЭС // Электрические станции. – 1974. – № 9. – С. 50–52.
4. Пискунов А. М., Майоров Н. И. О точности превышений, полученных из тригонометрического нивелирования короткими лучами // Геодезия и картография. – 1990. – № 1. – С. 12–14.
5. Беспалов Ю. И., Мирошниченко С. Г. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13.
6. Беспалов Ю. И., Дьяконов, Б. П., Терещенко Ю. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
7. Никонов А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 28–34.

8. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины при визировании над разными подстилающими поверхностями // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 28–33.
9. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35.
10. Никонов А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдений за осадками сооружений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (г. Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 78–86.
11. Подшивалов В. П., Али Салим. Тригонометрическое нивелирование коротким лучом // Геодезия и картография. – 1994. – № 6. – С. 18–19.
12. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом / Г. А. Уставич, М. Е. Рахымбердина, А. В. Никонов, С. А. Бабасов // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22.
13. Уставич Г. А., Рахымбердина М. Е. Разработка программ наблюдений тахеометром на нивелирной станции способом из середины // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (г. Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 163–168.
14. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования / Г. А. Уставич, С. В. Демин, Е. Л. Шалыгина, Я. Г. Пошивайло // Геодезия и картография. – 2005. – № 5. – С. 12–14.
15. Kovačič V., Kamnik R. Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements // Engineering modelling. – 2007. – № 20. – P. 77–84.
16. Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements / C. Hirt, S. Guillaume, A. Wisbar, B. Bürki, H. Sternberg // Journal of Geophysical Research (JGR). – 2010. – Vol. 115, D21102. Doi: 10.1029/2010JD014067.
17. Becker, J-M. Levelling over Öresund Dridge at the Millennium Level [Электронный ресурс] // TS5/2 Height Determination Questions. FIG XXII International Congress (April 19–26, 2002). – Washington, DC USA. – Режим доступа : http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts5-2/TS5_2_becker.pdf.
18. Flach P. Analysis of refraction influences in geodesy using image processing and turbulence models // Dissertation of Swiss Federal Institute of Technology. – Zurich, 2000, No. 13844.
19. Standards and practices for control surveys (SP1). Version 1.7 [Электронный ресурс] / Inter-governmental committee on surveying and mapping. – Sept. 2007. – Режим доступа : <http://www.icsm.gov.au/publications/sp1/sp1v1-7.pdf>. – Загл. с экрана.
20. Chrzanowski A. Implementation of trigonometric height traversing in geodetic leveling of high precision : Technical report № 142. – Canada : University of New Brunswick, 1989.

Получено 05.11.2018

© Г. А. Уставич, В. А. Скрипников,
Н. М. Рябова, М. А. Скрипникова, 2018

SPECIFIC ASPECTS OF HEIGHT ELEVATION TOOLS USED FOR DETERMINATION OF HEAT DEFORMATIONS IN SYSTEM "TURBOGENERATOR–FOUNDATION–GROUND"

Georgij A. Ustavich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc, Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: ystavich@mail.ru

Victor A Skripnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: v.a.skripnikov@ssga.ru

Nadezhda M. Ryabova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: ryabovanadezhda@mail.ru.

Margarita A. Skripnikova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: m.a.skripnikova@ssga.ru

The article considers the ways of points transmission to mounting horizons in the process of equipment assembly on the example of heat deformation determination in system "turbogenerator–foundation–ground" (TFG). Main attention is paid to providing required accuracy of measurements. The determination of heat deformations, considered in the article, is caused by the necessity for calculation (on the basis of geodetic data) of shaft line decentering values for their further installation during the process of assembling or repairing a turbogenerator. The article proposes several measurement methods for point transmission, which use high-precision total station and geodetic level. It gives the results of experimental measurements, carried out by the suggested methods. The use of high-precision devices for heat deformation detection of TFG system makes the point transmission process significantly easier, decreases the influence of main error sources and, if required, performs automatic monitoring of column length with a chosen time interval.

Key words: heat deformation, height elevation tools, high-precision level, total station, automatic monitoring system.

REFERENCE

1. Ustavich, G. A., Zhukov, B. N., & Malinovskij, A. L. (1978). Study of upper level deformation in turbogenerators' foundations. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 9, 34–37 [in Russian].
2. SO 153-34.21.322-2003. (2005). Methodological materials for carrying out observations over foundation settlement and deformation of buildings and constructions of thermo power stations in process of their construction and exploitation. Moscow [in Russian].
3. Perepechkin, A. A. (1974). Determination of upper plate deformation in 800 MVt turbogenerators of Slavjanskaya HPS. *Jelektricheskie stancii [Electrical Stations]*, 9, 50–52 [in Russian].

4. Piskunov, A. M., & Majorov, N. I. (1990). About the elevation accuracy, obtained by short-beamed trigonometric leveling. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 1, 12–14 [in Russian].
5. Bespalov, Ju. I., & Miroshnichenko, S. G. (2009). Research of elevation measurement accuracy with electronic total stations. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 3, 12–13 [in Russian].
6. Bespalov, Ju. I., D'jakonov, B. P., & Tereshhenko, Ju. (2010). Monitoring settlements of buildings and constructions by trigonometric leveling. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 8, 8–10 [in Russian].
7. Nikonov, A. V. (2014). Studying of vertical refraction influence on the results of short beam trigonometric levelling by method "From the middle". *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 1, 28–34 [in Russian].
8. Nikonov, A. V. (2013). Study of accuracy in trigonometric levelling by method "from the middle" when sighting over different underlying surfaces. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 3(23). 28–33 [in Russian].
9. Nikonov, A. V. (2013). Study of accuracy in trigonometric levelling by method "from the middle" with the use of total stations. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 2(22), 26–35 [in Russian].
10. Nikonov, A. V. (2013). Experience of trigonometric levelling with the use of electronic total stations for monitoring settlements of constructions. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodezija, geoinformatika, kartografija, markshejderija [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geomatics, Cartography, Mining]* (pp. 78–86). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
11. Podshivalov, V. P., Ali Salim (1994). Trigonometric levelling by short beam. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 6, 18–19 [in Russian].
12. Ustavich, G. A., Rahymberdina, M. E., Nikonov, A. V., & Babasov, S. A. (2013). Development and improvement of engineering and geodetic technology of trigonometric levelling method. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 6, 17–22 [in Russian].
13. Ustavich, G. A., & Rahymberdina, M. E. (2013). Development of monitoring programs by total stations with method "from the middle" on levelling station. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodezija, geoinformatika, kartografija, markshejderija [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geomatics, Cartography, Mining]* (pp. 163–168). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
14. Ustavich, G. A., Demin, S. V., Shalygina, E. L., & Poshivajlo, Ja. G. (2005). Development and improvement of engineering geodetic levelling technology. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 5, 12–14 [in Russian].
15. Kovačič, B., & Kamnik, R. (2007). Accuracy of trigonometric heighting and monitoring the vertical displacements. *Engineering modeling*, 20, 77–84.
16. Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B., & Sternberg, H. (2010). Monitoring of the refraction coefficient of the lower atmosphere using a controlled set-up of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. *Journal of Geophysical Research (JGR)*, 115, D21102. doi: 10.1029/2010JD014067.
17. Becker, J-M. (2002). Levelling over Öresund Dridge at the Millennium Level. In *TS5/2 Height Determination Questions. FIG XXII International Congress, April 19–26*. Washington, DC USA. Retrieved from http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts5-2/TS5_2_becker.pdf.
18. Flach, P. (2000). Analysis of refraction influences in geodesy using image processing and turbulence models. Dissertation of Swiss Federal Institute of Technology. Zurich., No. 13844.

19. Standards and practices for control surveys (SP1). (Sept. 2007). Version 1.7. Inter-governmental committee on surveying and mapping. Retrieved from <http://www.icsm.gov.au/publications/sp1/sp1v1-7.pdf>.

20. Chrzanowski, A. (1989). Implementation of trigonometric height traversing in geodetic leveling of high precision. Technical report № 142. Canada: University of New Brunswick.

Received 05.11.2018

© *G. A. Ustavich, V. A. Skripnikov,
N. M. Ryabova, M. A. Skripnikova, 2018*

УДК 528.48:626

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТЕНИЯ НА ОПЫТНОМ УЧАСТКЕ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2

Александр Валерьевич Устинов

АО «Институт Гидропроект», 125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 2, заместитель начальника комплексного отдела изысканий, e-mail: a.ustinov@hydroproject.ru; Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ст. преподаватель кафедры космической и физической геодезии

Выполнен обзор практического опыта применения технологии компенсационного нагнетания (compensation grouting) для стабилизации и подъема зданий и сооружений, проведен анализ результатов компенсационного нагнетания, приведенных в отечественных и зарубежных литературных источниках. Описаны цели и задачи исследовательских работ на опытном участке Загорской ГАЭС-2, выполненных специалистами ОАО «Институт Гидропроект» в 2016–2017 гг. Дана схема проведения работ на опытном участке и описание технологии компенсационного нагнетания. На примере опытного участка показаны принципы организации автоматизированного геодезического мониторинга смещений и деформаций. Представлен опыт геодезических наблюдений за вертикальными перемещениями сооружений опытного участка Загорской ГАЭС-2 в процессе компенсационного нагнетания. Детально описана автоматизированная система геодезического мониторинга перемещений конструкций опытного участка. Приведены результаты наблюдений за вертикальными перемещениями сооружений опытного участка в процессе компенсационного нагнетания. Проведено сравнение результатов автоматизированного мониторинга вертикальных перемещений с результатами нивелирования II класса. По результатам сравнения установлено, что точность автоматизированного определения высотных перемещений контролируемых точек по отклонениям от результатов нивелирования II класса в среднем по циклам составила $\pm 3,2$ мм. Даны рекомендации по повышению точности автоматизированных систем геодезического мониторинга.

Ключевые слова: компенсационное нагнетание, гидротехнические сооружения, автоматизированный мониторинг, вертикальные перемещения, Загорская ГАЭС-2, нивелирование II класса, геодезический мониторинг.

Введение

Технология компенсационного нагнетания применяется для стабилизации и подъема зданий и сооружений. Суть компенсационного нагнетания состоит в закачке в грунт специальных твердеющих растворов через скважины, располагаемые под основанием сооружения. В результате нагнетания происходит восстановление начального напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта и его увеличение до значений, позволяющих выполнить вертикальное перемещение сооружения [1, 2].

В различных литературных источниках отечественных и зарубежных авторов приводятся положительные результаты по применению метода компенсационного нагнетания для стабилизации и подъема зданий и сооружений [3–11].

При этом максимальные величины компенсируемых с помощью данной технологии осадок из мирового опыта достигали нескольких дециметров.

Для восстановления сооружений стационарного узла Загорской ГАЭС-2 после события 17 сентября 2013 г., в результате которого произошла осадка здания ГАЭС на 1,17 м [12, 13], проектно-изыскательским и научно-исследовательским институтом АО «Институт Гидропроект» был рекомендован вариант выравнивания стационарного узла Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания [13]. С целью оценки степени соответствия расчетных технологических параметров, положенных в основу разработанной математической модели, описывающей подъем здания ГАЭС при восстановлении станции, проектно-изыскательским и научно-исследовательским институтом АО «Институт Гидропроект» вблизи здания стационарного узла создан опытный участок, который представляет собой модель фундаментной плиты здания ГАЭС размерами в осях 10×10 м толщиной 6 м, заглубленную в грунт на глубину от 17 до 21 м, что позволяет моделировать фактическую нагрузку собственного веса здания ГАЭС на фундаментную плиту. Закачка инъекционного состава производится через манжетные колонны под модель фундаментной плиты [14].

На рис. 1 показана принципиальная схема опытного участка.

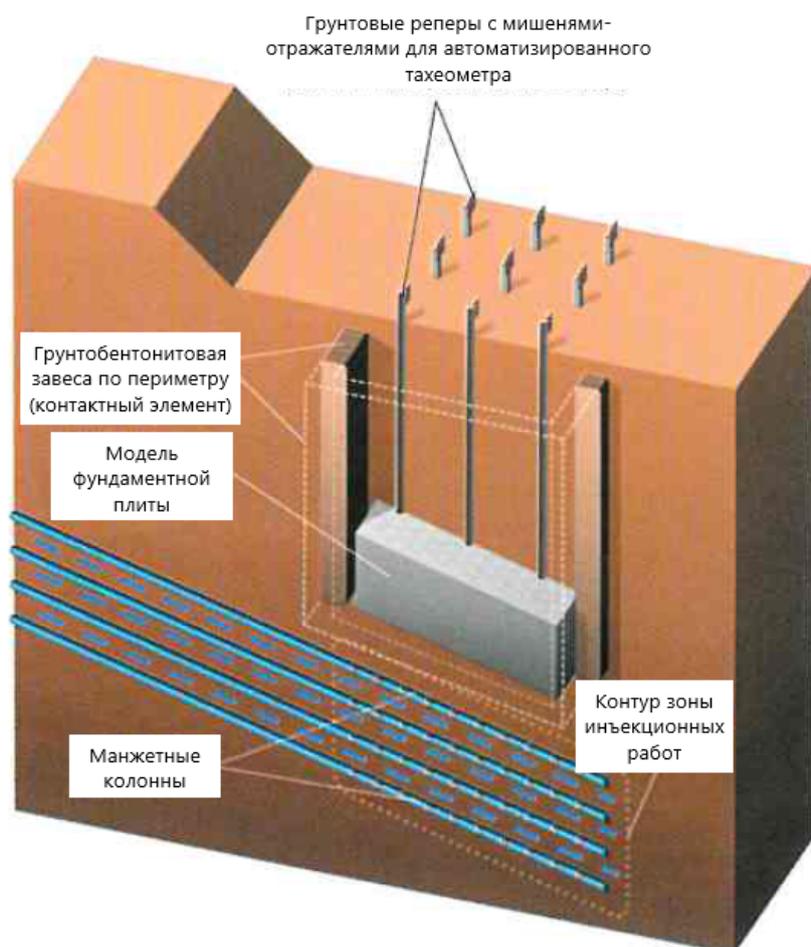


Рис. 1. Принципиальная схема опытного участка [14]

Для своевременного выявления пространственных смещений, предотвращения аварийных ситуаций, а также для оценки правильности результатов прогноза, принятых методов расчета и проектных решений, на опытном участке Загорской ГАЭС-2 создана сеть мониторинга, которая представляет собой 9 грунтовых глубинных реперов, заложенных в модель плиты, и 13 грунтовых наземных реперов, заложенных в грунт над поверхностью плиты.

На рис. 2 показана схема расположения грунтовых реперов на опытном участке.

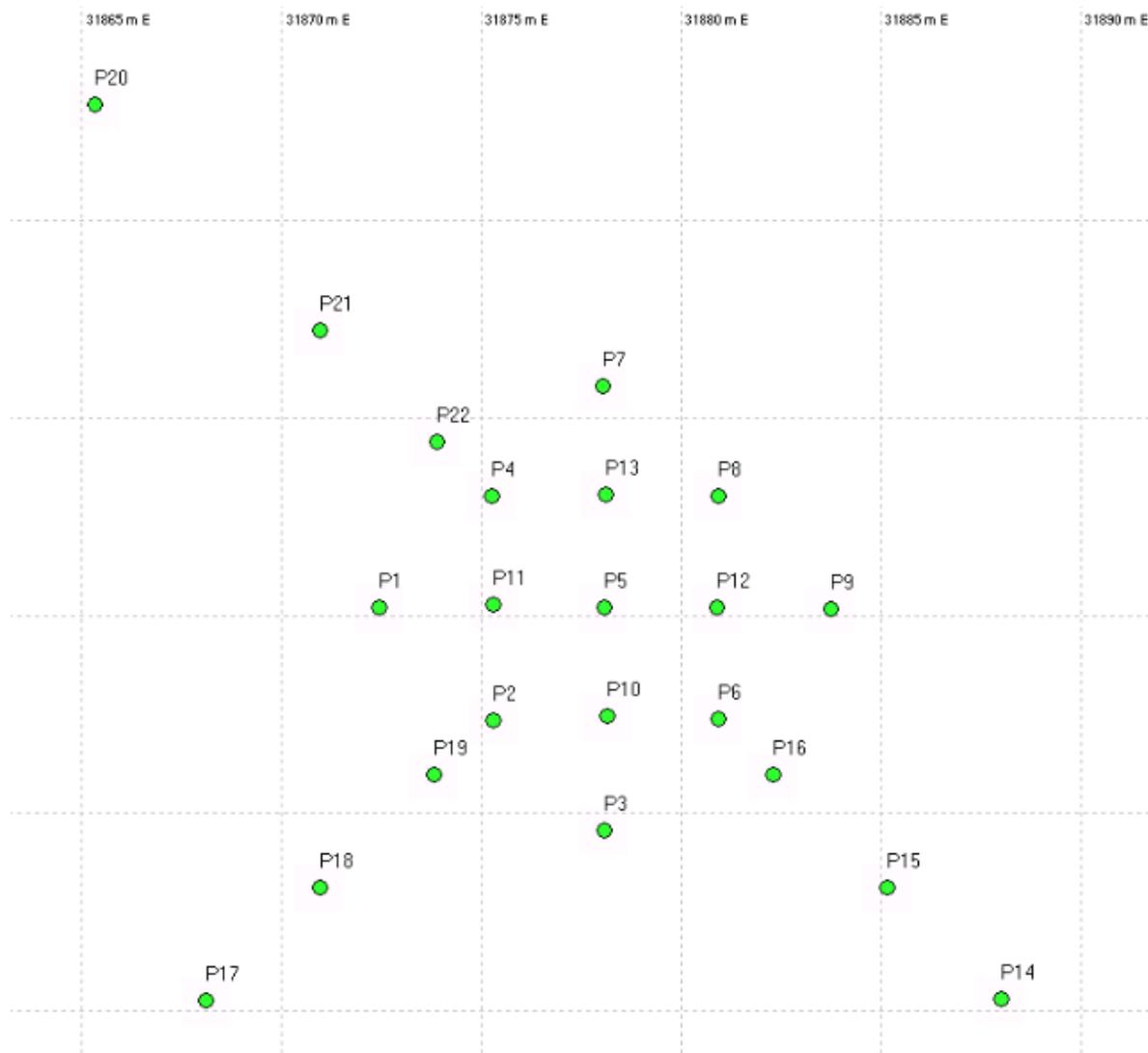


Рис. 2. Схема расположения грунтовых реперов на опытном участке Загорской ГАЭС-2

Целью данной работы является анализ результатов мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания на опытном участке Загорской ГАЭС-2.

**Автоматизированная система геодезического мониторинга (АСГМ)
вертикальных перемещений опытного участка**

Наблюдения за вертикальными перемещениями модели фундаментной плиты на опытном участке в период компенсационного нагнетания проводились в автоматизированном режиме с помощью роботизированного тахеометра.

Опыт использования АСГМ на основе роботизированных тахеометров для мониторинга деформаций и перемещений сооружений описан в отечественных и зарубежных источниках [15–21].

АСГМ вертикальных перемещений опытного участка Загорской ГАЭС-2 состояла из следующих конструктивных элементов.

1. Роботизированный тахеометр Leica TM30, имеющий угловую точность измерений 0,5'' и точность линейных измерений $\pm (0,6 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км})$.
2. Метеодатчик Leica TP.
3. Рефлекторные марки Leica GZM31, предназначенные для работы с автоматизированными электронными тахеометрами с автоматическим распознаванием на расстоянии до 45 м.
4. Отражатели Leica GPR121 и Leica GRZ4 (360°) для установки на опорных пунктах.
5. Оборудование передачи данных.
6. Программное обеспечение системы мониторинга Leica GeoMoS.

Автоматизированный тахеометр Leica TM30 фирмы Leica Geosystems (Швейцария) размещался на станции UV (рис. 3).



Рис. 3. Автоматизированный тахеометр и опорный отражатель

В АСГМ Загорской ГАЭС-2 контрольными пунктами являлись пункты геодезической сети ГАЭС MOST, BORT, UZ, а также марки на ПС-8 и ПС-10. На точках мониторинга использовались самоклеящиеся рефлексорные марки Leica GZM31, которые были установлены на пластины реперов таким образом, чтобы обеспечить видимость на каждую точку мониторинга со станции автоматизированного тахеометра.

На контрольных пунктах использовались отражатели Leica GPR121 (см. рис. 3) и Leica GRZ4 (360°). Для учета влияния метеопараметров в системе мониторинга был установлен метеодатчик.

Расстояния от тахеометра до отражающих марок составили от 25,2 до 44,5 м. Углы наклона линии визирования – от $-7^{\circ}15'$ до $-13^{\circ}28'$.

Регистрация наблюдений выполнялась с периодичностью не реже 1 раза в 15 минут в памяти автоматизированного тахеометра и на сервере, где было установлено программное обеспечение системы мониторинга Leica GeoMoS. Измерения на контрольные точки производились каждые 2 часа.

Результаты мониторинга вертикальных перемещений в процессе компенсационного нагнетания

Наблюдения в системе АСГМ проводились в течение 14 месяцев. Дважды в день выдавался отчет о вертикальных перемещениях контролируемых точек. Максимальное ежесуточное количество измерений на каждый репер составило 96 значений.

В результате был изучен характер изменения превышений контрольных реперов над опорным пунктом во времени. Для каждого из реперов получены временные ряды изменения превышений. На рис. 4–7 приведены графики вертикальных перемещений 9 грунтовых глубинных реперов, заложенных в модель плиты, и 13 грунтовых наземных реперов, заложенных в грунт над поверхностью плиты.

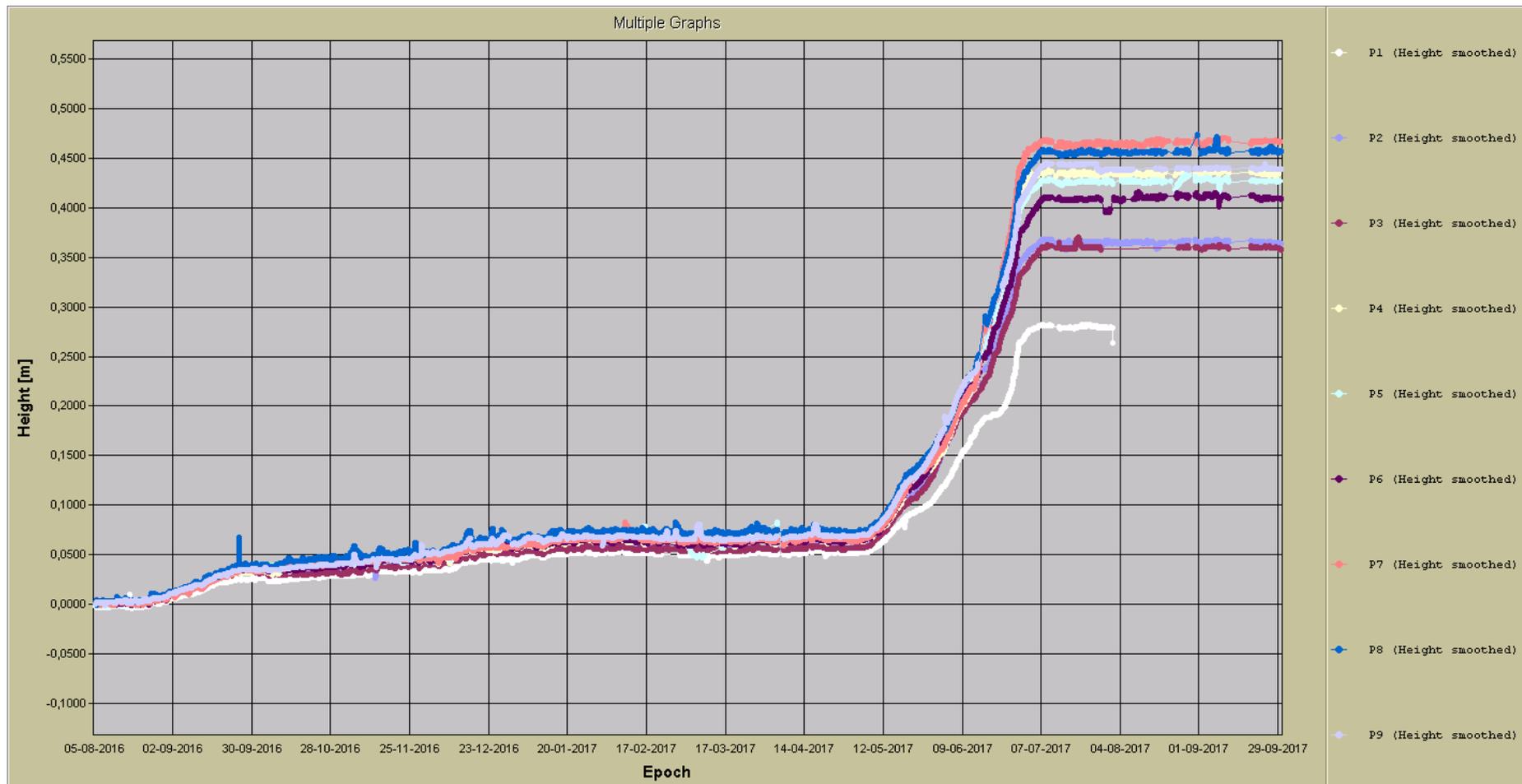


Рис. 4. График вертикальных перемещений глубинных реперов с 05.08.2016 по 30.09.2017

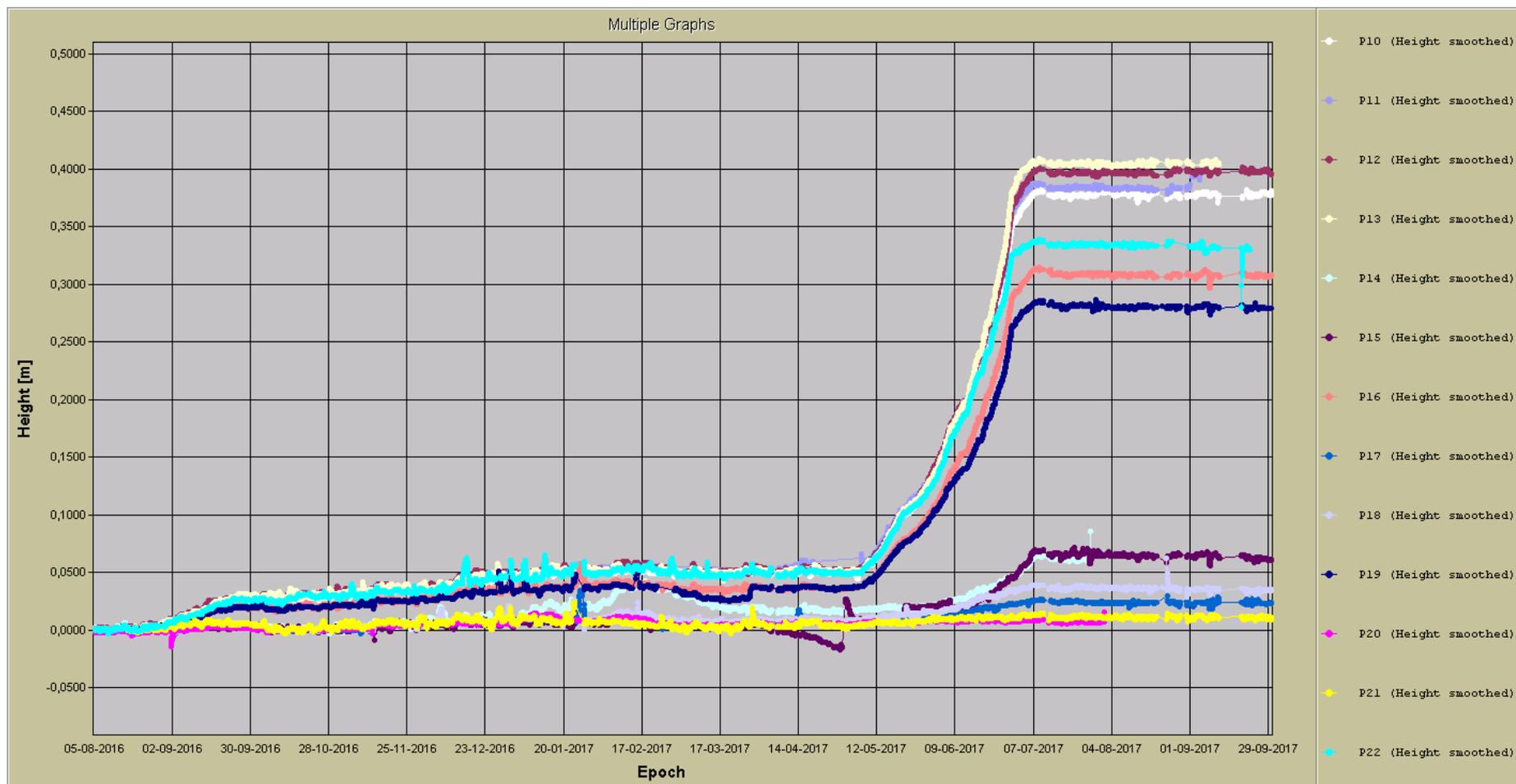


Рис. 5. График вертикальных перемещений наземных реперов с 05.08.2016 по 30.09.2017

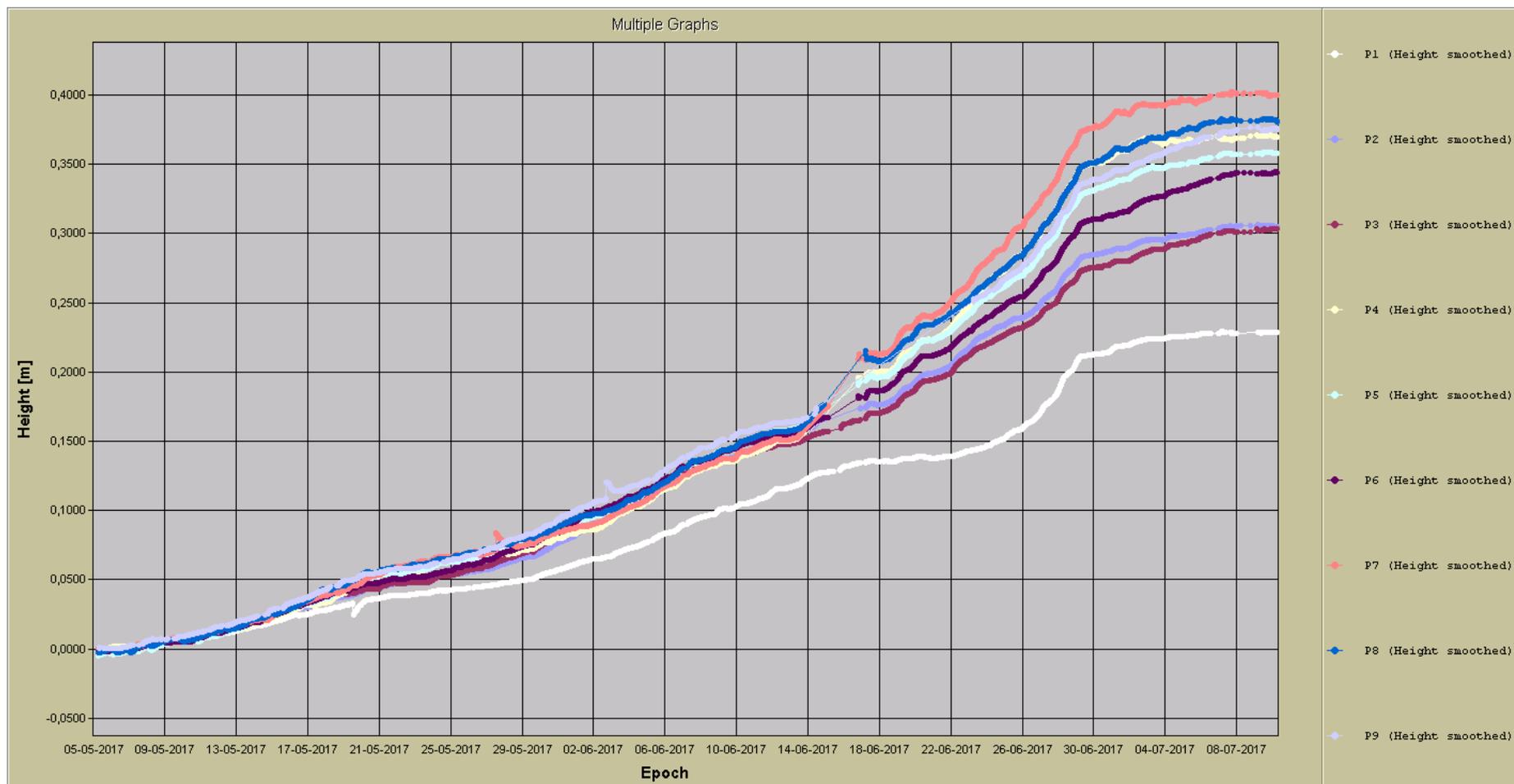


Рис. 6. График вертикальных перемещений глубинных реперов с 05.05.2017 по 10.07.2017

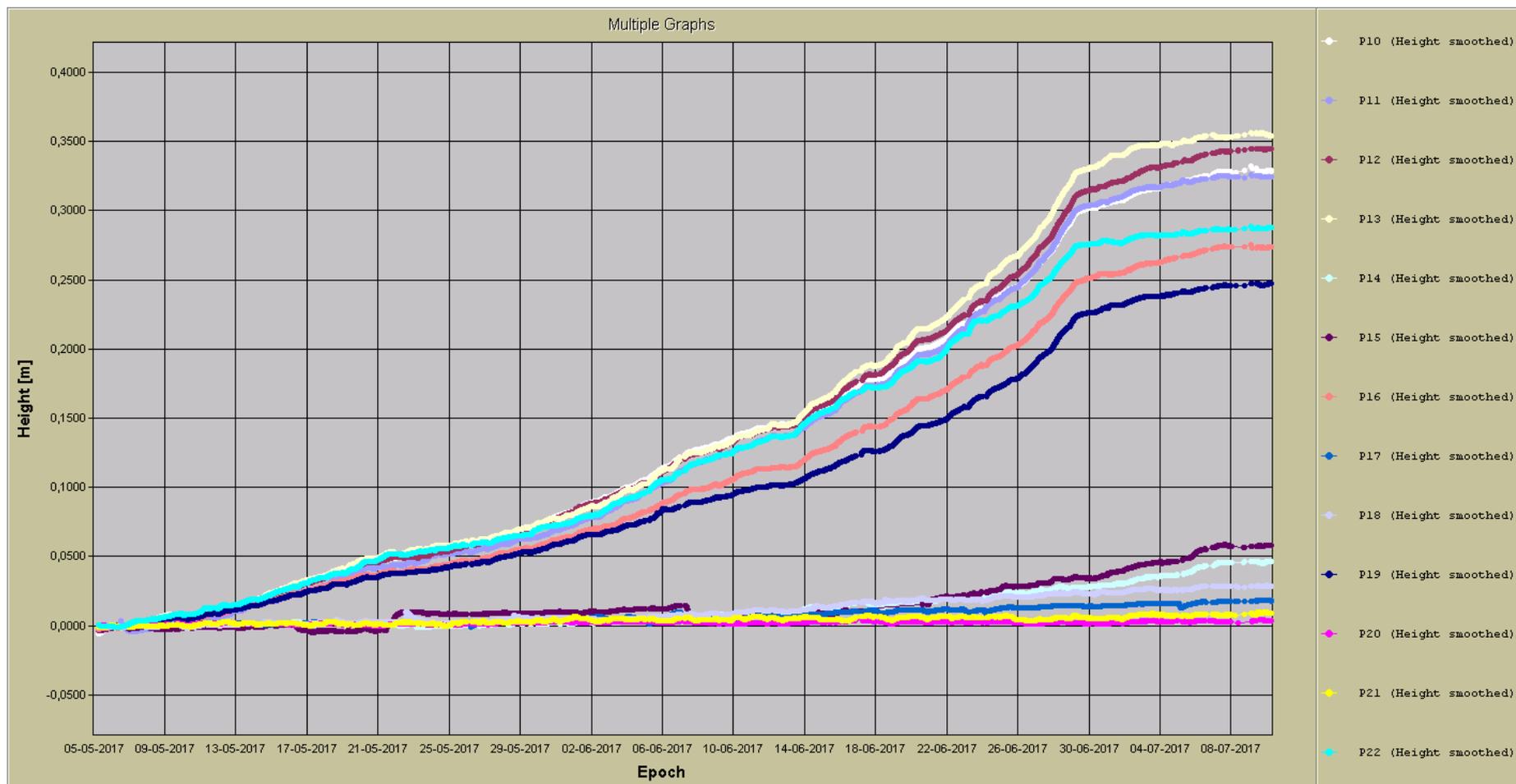


Рис. 7. График вертикальных перемещений наземных реперов с 05.05.2017 по 10.07.2017

Как видно из графиков вертикальных перемещений, приведенных на рис. 4–7, наибольший подъем и скорость подъема были зафиксированы с начала мая по начало июля 2017 г.

Максимальный подъем наблюдался на глубинном репере № 7 и составил за весь период мониторинга 468 мм, что соответствует расчетному эффективному объему инъецированных составов под фундаментной плитой.

В течение всего периода наблюдений не реже 1 раза в месяц проводился контроль результатов автоматизированной системы мониторинга перемещений методом геометрического нивелирования по программе нивелирования II класса. Нивелирование выполнялось цифровым нивелиром Leica DNA03 с точностью измерения превышения 0,3 мм на 1 км двойного хода.

Средние квадратические ошибки (СКО) измерений автоматизированной системой мониторинга по отклонениям от результатов нивелирования по циклам приведены в таблице.

Средние квадратические ошибки измерений
автоматизированной системой мониторинга
по отклонениям от результатов нивелирования по циклам

Номер цикла	СКО, мм	Номер цикла	СКО, мм
1	3,6	7	3,6
2	2,8	8	2,7
3	3,3	9	2,9
4	2,1	10	4,6
5	3,3	11	2,3
6	2,9		
Среднее: 3,2 мм			

Из таблицы можно сделать следующий вывод: точность автоматизированного определения высотных перемещений контролируемых точек по отклонениям от результатов нивелирования по циклам составляет $\pm 3,2$ мм.

Заключение

С целью оценки степени соответствия расчетных технологических параметров их реальным значениям на опытном участке Загорской ГАЭС-2 проведен мониторинг вертикальных перемещений модели фундаментной плиты в период компенсационного нагнетания в автоматизированном режиме с помощью роботизированного тахеометра Leica TM30. Точность автоматизированного определения высотных перемещений контролируемых точек по отклонениям от результатов нивелирования по циклам составила $\pm 3,2$ мм.

Для повышения точности результатов наблюдений в АСГМ предлагается применять высокоточные отражатели с точностью центрирования 0,3 мм, а

также использовать роботизированные тахеометры с угловой точностью в автоматическом режиме 0,5".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зерцалов М. Г., Симутин А. Н., Александров А. В. Технология компенсационного нагнетания для защиты здания и сооружений // Вестник МГСУ. – 2015. – № 6. – С. 32–40.
2. Технология выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания / А. И. Харченко, И. Я. Харченко, А. И. Панченко, Д. В. Газданов // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, Вып. 4 (115). – С. 490–498.
3. Валет Жан-Луи. Компенсационное нагнетание: технология в реальном времени // Метро и тоннели. – 2002. – № 4. – С. 16–19.
4. Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания / Е. Н. Беллендир, А. В. Александров, М. Г. Зерцалов, А. Н. Симутин // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 2. – С. 15–19.
5. Маковский Л. В., Чеботарев С. В. Ограничение осадок поверхности земли путем компенсационного нагнетания при строительстве тоннелей закрытым способом // Транспорт: наука, техника, управление. – 2000. – № 2. – С. 44–47.
6. Маковский Л. В., Кравченко В. В. Применение компенсационного нагнетания при строительстве подземных сооружений в сложных градостроительных условиях // Транспортное тоннелестроение. Современный опыт и перспективные разработки : сб. науч. тр. / под ред. В. Е. Меркина. – М. : ЦНИИС, 2008. – С. 112–120.
7. Рашендорфер Ю., Жуков В. Н., Майер К. Компенсационное нагнетание как способ обеспечения устойчивости зданий и сооружений при проходке тоннелей: специальные способы работ // Метро и тоннели. – 2008. – № 4. – С. 26–28.
8. Bezuijen A. Compensation grouting in sand: Experiments, field experiences and mechanisms: doctoral thesis on civil engineering and geosciences. – Delft, 2010. – 98 p.
9. Chambosse G., Otterbein R. State of the art of compensation grouting in Germany // Proceeding XV International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering. – Turkey, Istanbul, 2001. – P. 1511–1514
10. Mair Freng R., Harris D. Innovative engineering to control Big Ben's tilt // Ingenia. – 2001. – No. 9. – P. 23–27.
11. Schweiger H. F., Falk E. Reduction of settlements by compensation grouting – Numerical studies and experience from Lisbon underground // Tunnels and Metropolises. – Balkema, Rotterdam, 1998. – P. 1047–1052.
12. Вестник РусГидро. Корпоративная газета ОАО «РусГидро». Декабрь 2013 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rushydro.ru /upload/iblock/959/Vestnik_Rusgidro11_2013_w.pdf
13. Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и восстановительные работы / А. В. Александров, Е. Н. Беллендир, С. Я. Лашенов, Р. Ш. Альжанов // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 7. – С. 2–10.
14. Зерцалов М. Г., Симутин А. Н., Александров А. В. Расчетное обоснование компенсационного нагнетания при подъеме модели фундаментной плиты Загорской ГАЭС-2 // Гидротехническое строительство. – 2018. – № 8. – С. 2–6.
15. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
16. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.

17. Хиллер Б., Ли В. Т., Сухов И. В. Автоматизированная система деформационного мониторинга (АСДМ) на Саяно-Шушенской ГЭС // Инженерная защита. – 2014. – № 4 (4). – С. 36–43.

18. Lutes J. A. Automated Dam Displacement Monitoring Using A Robotic Total Station : Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 214. – Canada : University of New Brunswick, 2002. – 138 p.

19. Whitaker C., Duffy M., Chrzanowski A. Design of an automated dam deformation monitoring system: A case study // Journal of Geospatial Engineering. – 2000. – Vol. 2, No. 1. – P. 23–31.

20. Szostak-Chrzanowski A. Interdisciplinary Approach to Deformation Analysis in Engineering, Mining, and Geosciences Projects by Combining Monitoring Surveys with Deterministic Modelling // Technical Sciences Journal. – 2006. – Part I. – P. 147–172.

21. Szostak-Chrzanowski A. Interdisciplinary Approach to Deformation Analysis in Engineering, Mining, and Geosciences Projects by Combining Monitoring Surveys with Deterministic Modelling // Technical Sciences Journal. – 2006. – Part II. – P. 173–200.

Получено 31.10.2018

© А. В. Устинов, 2018

THE RESULTS OF THE MONITORING OF VERTICAL DISPLACEMENTS IN THE PROCESS OF COMPENSATION GROUTING AT THE EXPERIMENTAL SITE OF ZAGORSKAYA PSP-2

Alexander V. Ustinov

JSC "Institute Hydroproject", 2, Volokolamsk highway, Moscow, Russia, 125993, Deputy Head of the Complex Research Department, e-mail: a.ustinov@hydroproject.ru; Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Space and Physical Geodesy

The review of practical experience of application of technology of compensating injection (compensation grouting) for stabilization and rise of buildings and constructions is carried out, the analysis of results of compensation grouting given in domestic and foreign literary sources is carried out. The goals and objectives of the research work at the experimental site Zagorskaya PSP-2, made by specialists of JSC "Institute Hydroproject" in 2016–2017, are described. The scheme of work on the experimental plot and the description of technology of compensation grouting are given. The principles of organization of automated geodetic monitoring of displacements and deformations are shown on the example of the experimental site. The experience of geodetic observations of vertical movements of structures of the experimental site Zagorskaya PSP-2 in the process of compensation grouting is presented. The automated system of geodetic monitoring of movements of structures of the experimental site is described in detail. The results of observations of the vertical movements of the experimental site structures in the process of compensation grouting are presented. The results of automated monitoring of vertical displacements are compared with the results of class II leveling. According to the results of the comparison it was found that the accuracy of the automated determination of the altitude movements of the controlled points by deviations from the results of leveling of class II on average in cycles was ± 3.2 mm. Recommendations for improving the accuracy of automated systems of geodetic monitoring are given.

Key words: compensation grouting, hydraulic structures, automated monitoring, vertical displacements, Zagorskaya PSP-2, class II leveling, geodetic monitoring.

REFERENCES

1. Zertsalov, M. G., Simutin, A. N., & Aleksandrov, A. V. (2015). Application of Compensation Grouting Technology for Protection of Buildings and Structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, 6, 32–40 [in Russian].
2. Kharchenko, I. Ya., Panchenko, A. I., Kharchenko, A. I., & Gazdanov, D. V. (2018). Technology of alignment of the building of Zagorsk pumped storage station by compensation grouting method. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*, Vol. 13, Issue 4(115), 490–498 [in Russian].
3. Jean-Louis Valet. (2002). Compensation Grouting: the Technology in Real Time. *Metro i tonneli [Underground and Tunnels]*, 4, 16–19 [in Russian].
4. Bellendir, E. N., Aleksandrov, A. V., Zertsalov, M. G., & Simutin, A. N. (2016). Protection and alignment of buildings and structures using the technology of compensatory injection. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydro-engineering Construction]*, 2, 15–19 [in Russian].
5. Makovskiy, L. V., & Chebotarev, S. V. (2000). Limiting the Settlement of Earth Surface by Compensation Grouting during the Construction of Tunnels by Closed Method. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: Science, Technology, Management]*, 2, 44–47 [in Russian].
6. Makovskiy, L. V., & Kravchenko, V. V. (2008). The Use of Compensation Grouting in the Construction of Underground Structures in Complex Urban Conditions. In *Sbornik nauchnykh trudov: Transportnoe tonnelestroenie. Sovremennyy opyt i perspektivnye razrabotki [Collection of Scientific Works: Transport Tunneling. Current Experience and Future Developments]* (pp. 112–120). Moscow: TsNIIS Publ. [in Russian].
7. Rashendorfer, Yu., Zhukov, V. N., & Mayer, K. (2008). Compensatory Injection as a Method Sustainability of Buildings and Structures in Tunneling: Special Working Methods. *Metro i tonneli [Underground and Tunnels]*, 4, 26–28 [in Russian].
8. Bezuijen, A. (2010). Compensation grouting in sand: Experiments, field experiences and mechanisms. *Doctoral thesis on civil engineering and geosciences*. Delft, 98 p.
9. Chambosse, G., & Otterbein, R. (2001). State of the art of compensation grouting in Germany. *Proceeding XV International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 1511–1514). Turkey, Istanbul.
10. Mair Freng, R., & Harris, D. (2001). Innovative engineering to control Big Ben's tilt. *Ingenia*, 9, 23–27.
11. Schweiger, H. F., & Falk, E. (1998). Reduction of settlements by compensation grouting – Numerical studies and experience from Lisbon underground. In *Tunnels and Metropolises* (pp. 1047–1052). Balkema, Rotterdam.
12. Vestnik RusHYDRO. (n. d.). Retrieved from [http://www.rushydro.ru /upload/iblock/959/Vestnik_Rusgidro11_2013_w.pdf](http://www.rushydro.ru/upload/iblock/959/Vestnik_Rusgidro11_2013_w.pdf) [in Russian].
13. Aleksandrov, A. V., Bellendir, E. N., Lashchenov, S. Ya., & Aljzhanov, R. Sh. (2016). Elimination of the consequences of the draft of the Zagorskaya PSHPP-2 station building and the reconstruction works. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Power Technology and Engineering]*, 7, 2–10 [in Russian].
14. Zertsalov, M. G., Simutin, A. N., & Aleksandrov, A. V. (2018). The use of FEM for the numerical forecast of the results of controlled compensation grouting. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Power Technology and Engineering]*, 8, 2–6 [in Russian].
15. Hiller, Bernd, & Jambaev, H. K. (2016). Development and natural tests of automated systems of deformation monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 48–61 [in Russian].
16. Sholomitsky, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2017). High Precision Geodetic Measurements at Deformation Monitoring of Aquapark. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 45–59 [in Russian].

17. Hiller, B., Li, V. T., & Sukhov, I. V. (2014). Automated deformation monitoring system (ASDM) at the Sayano-Shushenskaya HPP. *Inzhenernaya zashchita [Engineering Protection]*, 4(4), 36–43 [in Russian].
18. Lutes, J. A. (2002). Automated Dam Displacement Monitoring Using A Robotic Total Station. Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 214. Canada: University of New Brunswick, 138 p.
19. Whitaker, C., Duffy, M., & Chrzanowski, A. (2000). Design of an automated dam deformation monitoring system: A case study. *Journal of Geospatial Engineering*, 2(1), 23–31.
20. Szostak-Chrzanowski, A. (2006). Interdisciplinary Approach to Deformation Analysis in Engineering, Mining, and Geosciences Projects by Combining Monitoring Surveys with Deterministic Modelling. *Technical Sciences Journal*, Part I, 147–172.
21. Szostak-Chrzanowski, A. (2006). Interdisciplinary Approach to Deformation Analysis in Engineering, Mining, and Geosciences Projects by Combining Monitoring Surveys with Deterministic Modelling. *Technical Sciences Journal*, Part II, 173–200.

Received 31.10.2018

© A. V. Ustinov, 2018

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 528.9(571.53)

СУЩНОСТЬ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА: ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Андрей Николаевич Бешенцев

Байкальский институт природопользования СО РАН, 670031, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, доктор географических наук, профессор РАН, зав. лабораторией, тел. (3012)43-36-76, e-mail: abesh@mail.ru

Дарима Гармаевна Будаева

Байкальский институт природопользования СО РАН, 670031, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, кандидат географических наук, ведущий инженер, тел. (3012)43-36-76, e-mail: budaevadarima@yandex.ru

Эрдэни Доржиевич Санжеев

Байкальский институт природопользования СО РАН, 670031, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, тел. (3012)43-36-76, e-mail: esanzheev@gmail.com

Александр Александрович Лубсанов

Байкальский институт природопользования СО РАН, 670031, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, ведущий инженер, тел. (3012)43-36-76, e-mail: alub@binm.ru

Татьяна Анатольевна Борисова

Байкальский институт природопользования СО РАН, 670031, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, тел. (3012)43-36-76, e-mail: tabor@binm.ru

Эдуард Аюрович Батоцыренов

Байкальский институт природопользования СО РАН, 670031, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, кандидат географических наук, научный сотрудник, тел. (3012)43-36-76, e-mail: edikbat@gmail.com

В статье сформулированы научные основы туристско-рекреационного информационного пространства (ТРИП) как феномена, обусловленного современной информатизацией территориальной деятельности, особенность которого заключается в создании и использовании пространственно координируемых ресурсов, описывающих природные и социально-экономические объекты и процессы, представляющие интерес для туризма и рекреации. Представлена организационная блок-схема ТРИП и установлены основные информационные потоки, формирующие пространство. Выполнен анализ компонентов ТРИП, раскрыта спе-

цифика его территориальной, социальной, функциональной и нормативно-правовой структуры. Рассмотрен процесс информационного взаимодействия в сфере туризма и рекреации, определены источники и особенности информационных ресурсов туристско-рекреационной тематики, определен их контент и условия размещения. На примере ТРИП побережья оз. Байкал разработаны методические основы картографирования информационной инфраструктуры, представлен практический пример карты.

Ключевые слова: субъекты туристической индустрии, информационные ресурсы, информационная инфраструктура, туристско-рекреационное информационное пространство, картографирование.

Введение

Значимой характеристикой современной туристско-рекреационной индустрии является информатизация всех субъектов туристического рынка (туроператоры, турагентства, клиенты). Одним из направлений государственного регулирования туристской деятельности в Российской Федерации (РФ) является информационное обеспечение туризма [1]. Обмен информацией и другие виды информационной активности субъектов являются основой успешного нормативно-правового, экономического и природоохранного взаимодействия. При этом одним из основных направлений реализации Стратегии развития информационного общества в РФ [2] является «формирование единого информационного пространства». Материальным базисом информационного пространства является информационная инфраструктура (ИИ) – совокупность информационных центров, банков данных и знаний, систем связи, обеспечивающая доступ потребителей к информационным ресурсам [3].

В этих условиях, для сферы туризма и отдыха, важное значение приобрели прикладные средства навигации и глобального позиционирования, географические информационные системы (ГИС) и картографические сервисы, обеспечивающие производство и распространение информационных ресурсов туристско-рекреационной тематики. Современный уровень стандартизации интерфейсов тематических приложений, как для персональных компьютеров, так и мобильных устройств, а также простота методик персонального картографирования, средств доступа, языков запросов и описания географических объектов обеспечивают клиенту взаимодействие с любой базой туристско-рекреационных данных, независимо от ее архитектуры и технологической реализации. Организация удаленного доступа к таким ресурсам и сервисам и непрерывное функционирование телекоммуникационных систем позволяет говорить о развитии глобального информационного пространства.

О формировании информационного пространства заговорили в конце прошлого века [4–7]. В настоящее время развитие информационного пространства представляется как универсальный механизм глобализации различных видов человеческой деятельности [8–10]. Внутри информационного пространства отдельным сегментом выделяется геоинформационное пространство [11, 12],

которое подразделяется на множество тематических пространств, одним из которых является туристско-рекреационное информационное пространство. Именно в ТРИП сосредоточены заинтересованные поставщики услуг [13], куда обращаются клиенты для ознакомления с особенностями выбранной дестинации, поиска надежного туроператора, приобретения тура, бронирования жилья и т. п. [14]. В ТРИП осуществляется интеграция информации о природных достопримечательностях, историко-культурных, бальнеологических особенностях и других характеристиках отдельных регионов и дестинаций, сведения о смежных видах деятельности (торговля, медицинское обслуживание, общественное питание и др.) и нормативно-правовом обеспечении туристско-рекреационной деятельности [15], а также данные земельно-кадастровой оценки территории [16]. Кроме того, создание единого ТРИП признается важным инструментом совершенствования государственной политики в сфере туризма и рекреации [17] и частью социокультурного пространства региона [18]. Основными элементами ТРИП считаются информационное обеспечение, информационные центры, информационный менеджмент [19], информационно-консультационная служба. Таким образом, разработка научных основ развития ТРИП представляет собой перспективное исследовательское направление, а геоинформационная оценка и анализ его компонентов на региональном уровне являются важной практической задачей.

Наше исследование базируется на информационном подходе, предполагающим более широкий взгляд на информационную природу объектов и процессов географической действительности, а также – на системную оценку их участия в процессе информационного взаимодействия. Рассматриваемые объекты и процессы включены в информационное пространство не как физические сущности, а как участники информационного взаимодействия, производители и потребители информационных ресурсов.

Научные основы ТРИП

Образование и развитие ТРИП является следствием территориальной деятельности и всецело связано с информатизацией общества. Современное ТРИП является сегментом глобального информационного пространства, его виртуальную основу составляют тематические информационные ресурсы (ИР), отчуждаемые от субъективного сознания и функционирующие в телекоммуникационных системах и по каналам связи. Его специфика заключается в том, что оно базируется на пространственно координируемых ресурсах, описывающих природные и социально-экономические объекты и процессы, представляющие интерес для туризма и рекреации. Локализацию ТРИП на земной поверхности обеспечивают источники геоинформации – описываемые географические объекты и процессы. Сущностную основу пространства составляют сайты туристско-рекреационной тематики, сайты туроператоров и турагентов, интернет-сервисы, мобильные приложения. Контентом ТРИП являются локализованные

географические сведения, это могут быть как простейшие адресные данные коллективных средств размещения (КСР), так и результаты различных проблемно-ориентированных исследований, географические формализованные расчеты (нагрузки, уязвимости и т. п.), описания маршрутов, отчеты о путешествиях. Информационное взаимодействие поставщиков услуг и клиентов осуществляется посредством тематических блогов, форумов, социальных сетей.

Современное ТРИП складывается из следующих главных компонентов:

- *территория (дестинация)* как источник географических сведений и пространственно-временной базис ТРИП;
- *информационные ресурсы* как организованная совокупность информационных массивов, имеющих туристско-рекреационный географический контент;
- *пользователи-производители ИР (туроператоры, турагенты, предприниматели)*, обеспечивающие создание ресурсов, функционирование и развитие ТРИП, сбор, обработку, хранение, распространение, поиск и передачу информации, разработку программного обеспечения;
- *пользователи-потребители ИР (туристы, путешественники и др.)*;
- *средства информационного взаимодействия*, обеспечивающие создание и доступ к ресурсам на основе соответствующих информационных технологий, различных программно-технических устройств, сетей, космических приемопередающих комплексов и т. п.

Таким образом, современное ТРИП представляет собой *территориальную систему пользователей, информационных ресурсов, программно-технических средств взаимодействия и информационных потоков между ними* (рис. 1).

Специфика *территориальной структуры ТРИП*, в первую очередь, обусловлена географической упорядоченностью его компонентов. Территориальная структура ТРИП дублирует сложившуюся селитебную и транспортно-коммуникационную инфраструктуру освоенной земной поверхности. Субъекты, предоставляющие услуги для туризма и рекреации, ИР и средства информационного взаимодействия сосредоточены в административно значимых и крупных населенных пунктах. Следовательно, объем и предметная специфика ИР, а также количество средств информационного взаимодействия обусловлены численностью и деятельностью местных жителей по предоставлению соответствующих услуг и информированию всех субъектов туристско-рекреационной деятельности. Эта особенность пространственного размещения определяет крупные административные и экономические центры как системообразующие узлы ТРИП. В этих населенных пунктах сосредоточены основные муниципальные учреждения, органы управления территориальным развитием, имеются почтовые отделения и библиотеки, они обладают высоким образовательным и производственным потенциалом. Именно в крупных населенных пунктах формируется рынок информационных туристско-рекреационных продуктов и услуг как экономическая основа современного ТРИП.

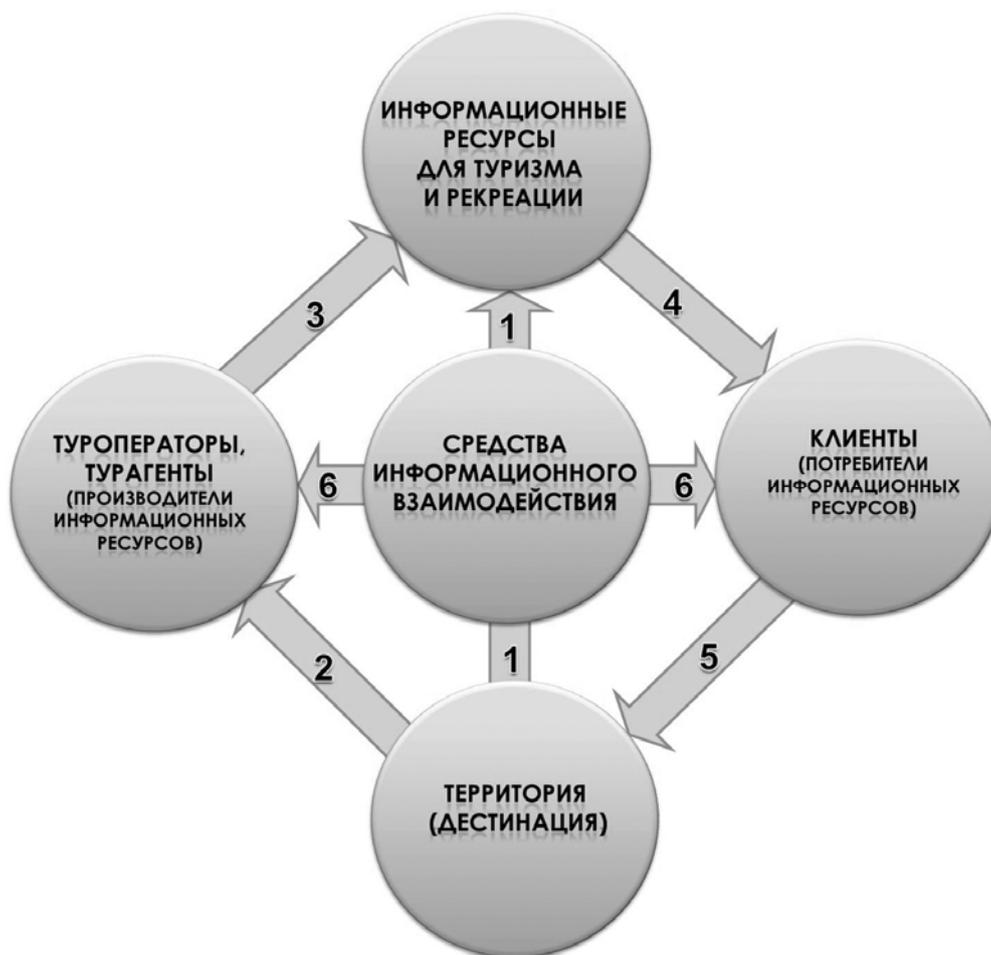


Рис. 1. Структура ТРИП. Информационные потоки:

1 – автоматическое создание ИР (метеостанции, посты мониторинга, спутники и т. п.); 2 – полуавтоматическое создание ИР (маршрутная съемка, видеозапись и т. п.); 3 – создание и публикация ИР (туристские карты, диски, видеопродукция и т. п.); 4 – использование ИР (справочное, образовательное и т. п.); 5 – решение территориальных задач (управление, реагирование на ЧС, минимизация экологических последствий туристско-рекреационной деятельности и т. п.); 6 – информационный обмен (переписка, консультирование)

Социальная структура ТРИП представляет собой совокупность социальных групп, обособленных профессиональной деятельностью, формами участия в информационном взаимодействии, активностью и значением в производстве и использовании ИР. Социальная структура обозначает относительно стабильные информационные отношения, существующие между социальными группами, и организацию специфически групповых или индивидуальных позиций, отличающихся особым статусом (землепользователи, обучающиеся, управленцы, туристы и т. д.).

Нормативно-правовая структура ТРИП обозначает характер и виды законодательных документов, регламентирующих туристско-рекреационную дея-

тельность, информационное взаимодействие, обеспечение безопасности персональных данных и средств информационного взаимодействия, защиту прав субъектов деятельности на основе международного права.

Функциональная структура ТРИП обусловлена широким спектром возникающих задач экономического, социального, природоохранного характера. Основными социально-экономическими функциями ТРИП являются: коммуникационная, обеспечивающая связь производителей и потребителей ИР; оперативно-справочная, обеспечивающая доступ к ресурсам и сервисам; образовательная, обеспечивающая удовлетворение учебно-образовательных потребностей социума; информационно-управленческая, обеспечивающая информирование и координацию управленческих структур, проектных организаций, ведомств, сообществ. Множество функций сгруппировано в сервисы, дающие возможность пользователям получать государственные услуги и дистанционно решать практические задачи (оформление загранпаспорта, покупка путевки, бронирование КСР и т. п.), традиционные почтовые и другие сервисы.

Информационное взаимодействие в ТРИП

Информационные ресурсы описывают природные, социальные, экономические и другие территориальные объекты и процессы. Особенностью ИР ТРИП является наличие географической составляющей, а именно интеграции топологических и качественно-количественных параметров геообъектов и территориальная привязка формализуемых сведений, точность которой обусловлена видом ресурса и формой (форматом) его представления [20]. В основе классификации ИР лежит их разделение на пространственные и тематические ресурсы. Тематическая характеристика ИР, их содержание и смысл определяются понятием контент – совокупность информационных ресурсов определенной предметной области. Единицей контента является документ – зафиксированная на электронном носителе идентифицируемая информация, созданная, полученная и сохраняемая участниками туристско-рекреационной деятельности. Каждый документ имеет содержание и географический контекст. Содержание – фактическая информация документа, фиксирующая территориальные объекты, процессы, факты, решения и т. п. Географический контекст – это, как правило, физико-географическое описание территории или координатные данные. В настоящее время регистрация координат объектов с помощью приемников глобального позиционирования позволяет любому пользователю выполнить простейшую геодезическую съемку и картографирование посещаемой территории и, следовательно, создавать и публиковать индивидуальные ИР.

Процесс создания-использования ИР осуществляется под влиянием требований субъектов деятельности: с одной стороны – как производителей ресурсов (форматы, классификации и т. п.), а с другой – как потребителей ресурсов (наглядность, обзорность, язык представления и т. п.). При этом ресурсы могут быть созданы пользователями как при непосредственном взаимодействии

с объектами (полевые обследования, туризм и т. п.), так и на основании уже имеющихся геоинформационных моделей (карты, данные дистанционного зондирования) при косвенном изучении территории. Полезность и востребованность ИР определяется их значением при решении конкретной пространственной задачи.

Размещение ИР осуществляется в национальных серверных зонах. Как правило, ресурсы создаются на национальных языках пользователей конкретного региона и дублируются на английском языке, что обеспечивает к ним широкий доступ мирового сообщества. При этом, по пространственному размещению ИР подразделяются на внутренние – размещенные на национальных серверах и являющиеся продуктом собственника территории (например: «Байкал - Бурятия: туризм и отдых» <http://baikaltravel.ru/>, «Озеро Байкал» <http://ozerobaikal.info/>, «Магия Байкала» <http://www.magicbaikal.ru/>, «Байкал Туристик» <http://baikaltouristik.ru/> и др.), а также внешние – создаваемые и публикуемые в других точках планеты (например: «Travel All Russia» www.travelallrussia.com, «Advantour» <https://www.advantour.com>, «Lake Baikal» <https://lakebaikal.org/>, «Lonely Planet» <https://www.lonelyplanet.com>). Такое положение дел ставит вопросы об информационном суверенитете географической территории и возможности манипулирования общественным мнением с целью искажения образа территории в глазах мирового сообщества.

Как объект картографирования, ТРИП представляет собой линейно-узловую пространственную структуру, совмещенную с селитебной и транспортно-коммуникационной инфраструктурой территории. Картографирование компонентов ТРИП осуществляется на основе сложившегося масштабного ряда, установленной планово-высотной точности локализации объектов, традиционных способов картографического изображения, правил генерализации. При этом актуальными являются вопросы картографирования качественно-количественных показателей этого явления, картометрической оценки отдельных характеристик, правил семиотического отображения картографируемых объектов.

Основная масса субъектов-поставщиков услуг сосредоточена в населенных пунктах – узлах ТРИП, картографирование которых, в зависимости от масштаба, осуществляется либо способом значков, либо способом ареалов. ИР, средства взаимодействия и телекоммуникационная инфраструктура, так или иначе, связаны с деятельностью социума, следовательно, картографическая оценка этих компонентов осуществляется посредством определения обеспеченности пользователей и территории информационными, электронными и коммуникационными составляющими по единицам территориально-административного деления. Картографирование обеспеченности населения средствами информационного взаимодействия осуществляется точечным способом, диаграммами, качественным либо количественным фоном. Обеспеченность населения и территории этим компонентом ТРИП картографируется, как правило, с помощью картограмм и количественного фона по единицам территориально-административного деления. Например, при оценке ИР конкретной территории такой

величиной будет среднее количество описывающих ресурсов (баз данных, страниц, доменов) на одного жителя, а при оценке средств информационного взаимодействия такой величиной будет среднее количество компьютеров с веб-доступом на одного жителя либо на 1 км² территории. Обеспеченность населения и территории этим компонентом картографируется, как правило, с помощью картограмм и количественного фона.

Особенности регионального ТРИП

Для определения сущности и основных характеристик ТРИП, в качестве модельной дестинации использовался участок Центральной экологической зоны Байкальской природной территории в границах Республики Бурятия (ЦЭЗ БПТ РБ). Это наиболее освоенная территория в плане туризма и рекреации. Здесь расположены основные рекреационные местности, проложены популярные туристские маршруты, сосредоточено значительное количество КСР и визит-центров.

На территории ЦЭЗ БПТ РБ узлами ТРИП являются города и административные центры сельских поселений (рис. 2).

На территории ЦЭЗ на рынке услуг электросвязи предоставляются практически все виды услуг, включая местную, междугородную и международную телефонную связь, документальную и радиотелефонную связь, передачу данных и доступ к сети Интернет, услуги проводного радиовещания. Все вышеперечисленные услуги оказывает Бурятский филиал ОАО «Сибирьтелеком», ОАО «АК Мобилтелеком», ОАО «Информационные сети Бурятии», ООО «Байкальские информационные кабельные сети», ОАО «Мегафон», ОАО МТС, ЗАО «Байкалвестком», ОАО «Билайн».

В целях обеспечения потребностей крупных населенных пунктов в современных цифровых каналах связи из г. Улан-Удэ в районные центры проложены волоконно-оптические линии связи (Кабанск, Турунтаево, Бабушкин). Кроме того, в каждом населенном пункте ЦЭЗ имеются таксофоны со связью через спутник с обеспечением бесплатного доступа к экстренным оперативным службам, а в административных центрах имеются пункты коллективного доступа в сеть Интернет. Услуги связи в Северо-Байкальском районе оказывают: Бурятский филиал ПАО «Ростелеком», Билайн, Мегафон, ООО «Телекомсервис», ООО «Байкал Диалог», обособленное структурное подразделение Северо-Байкальский почтамт ФГУП «Почта России». В 2016 г. в целях расширения услуг связи для населения, в том числе сотовой, ПАО «Ростелеком» проложена оптоволоконная линия связи в п. Нижнеангарск и п. Кичера.

Для обеспечения оперативного обмена информацией между администрациями муниципальных образований и министерствами РБ (МЧС РБ, Минтуризма РБ и др.) функционирует корпоративная сеть передачи данных. С целью повышения качества, оперативности и комфортности предоставления государственных услуг населению и отдыхающим на территории ЦЭЗ (Кабанский и

Прибайкальский району) ведутся работы по организации деятельности органов муниципальной власти в режиме «одного окна» и созданы клиентские службы по оказанию мер социальной поддержки туристов с применением автоматизированной информационной системы «Клиентская служба».

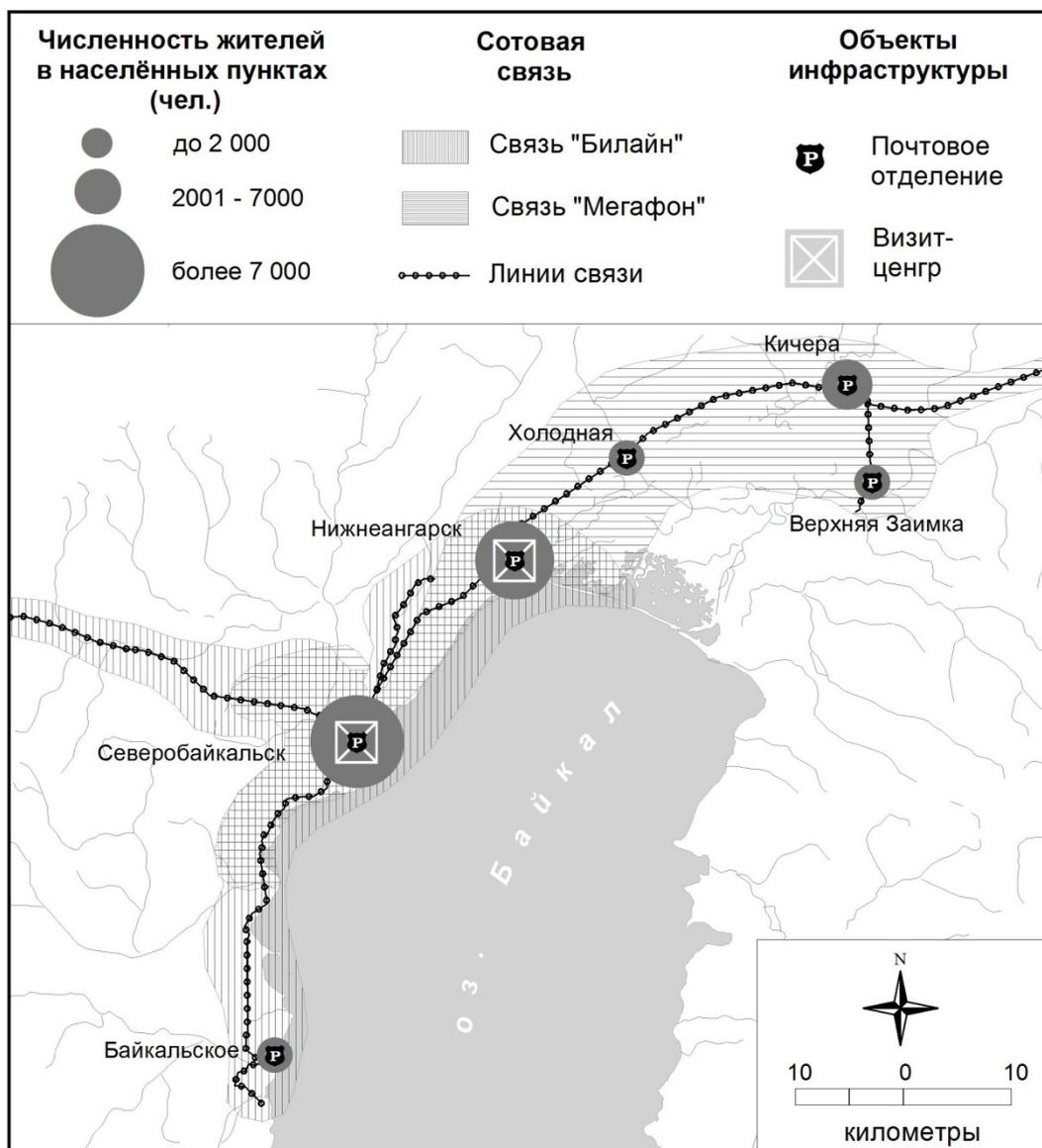


Рис. 2. Фрагмент карты «Туристско-рекреационное информационное пространство ЦЭЗ БПТ»

Почтовая связь является наиболее значимым видом связи на территории ЦЭЗ. В настоящее время наиболее разветвленной сетью на территории ЦЭЗ обладает УФПС РБ – филиал ФГУП «Почта России». Почтовые отделения имеются в административных центрах поселений и в наиболее крупных населенных пунктах. Остальные сельские населенные пункты обслуживаются передвижными отделениями почтовой связи или почталыонами стационарных отде-

лений. Услугами почтовой связи охвачены все населенные пункты ЦЭЗ. В настоящее время принята концепция развития федерального почтового банка, в соответствии с которой в течение пяти лет вся территория побережья оз. Байкал будет охвачена сетью отделений новой общенациональной банковской структуры на базе инфраструктуры Почты России. Такое техническое решение будет способствовать обеспечению оперативного доступа туристов к банковским продуктам и услугам в месте проживания.

Заключение

Следует отметить, что в настоящее время информационные ресурсы и телекоммуникационные системы на территории ЦЭЗ размещены крайне неравномерно. Такая локализация соответствует расположению административных центров и не учитывает потребности туристов. При этом на региональном уровне отсутствует единая база данных туроператоров и турагентов, что ограничивает активность потенциальных туристов и сдерживает развитие туризма на Байкале. Кроме того, необходимо наличие единого геопортала туристско-рекреационной тематики, обеспечивающего оформление тура в режиме «одного окна». Важным препятствием для развития информационной инфраструктуры является отсутствие единых правил организации туризма и отдыха, обеспечивающих соблюдение предельно допустимых норм нагрузок на окружающую природную среду и регламентирующих строительство объектов инфраструктуры.

Таким образом, основными задачами при формировании и развитии единого ТРИП территории ЦЭЗ является достижение необходимого уровня информационного потенциала региона посредством создания согласованных информационных ресурсов и развития общей информационной инфраструктуры ЦЭЗ (Республика Бурятия и Иркутская область).

Статья подготовлена в рамках выполнения Государственного контракта № 9 от 19 июня 2018 г. на разработку научно-исследовательской работы по теме «Научно-методическое обоснование формирования Правил организации туризма и отдыха, обеспечивающих соблюдение предельно допустимых норм нагрузок на окружающую природную среду в центральной экологической зоне Байкальской природной территории Республики Бурятия».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об основах туристской деятельности в Российской Федерации [Электронный ресурс] : фед. закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ (последняя редакция). – Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс».
2. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации [Электронный ресурс] : приказ Президента РФ от 07.02.2008 № Пр-212. – Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс».
3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 7.0-99 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Информационно-библиотечная деятельность, библио-

графия. Термины и определения [Электронный ресурс] : постановление Госстандарта РФ от 07.10.1999 № 334-ст. – Доступ из справ.-правовой системы «Консультант плюс».

4. Семенюк Э. П. Информационный подход к познанию действительности. – Киев : Наукова думка, 1988. – 239 с.

5. Сербенюк С. Н. Картография и геоинформатика – их взаимодействие // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 1989. – № 5. – С. 3-8.

6. Семенюк Э. П. Развитие информационного пространства и прогресс общества // НТИ. Серия 1. – 1997. – № 1. – С. 1–12.

7. Тикунов В. С., Цапук Д. А. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. – Смоленск : СГУ, 1999. – 176 с.

8. Лаишевская Р. Р. Постигание смысла единого информационного пространства через дефиниции информация, информационная среда, информационное пространство // Вестник Казанского государственного университета культуры и искусств. – 2005. – № 3. – С. 198–202.

9. Семенюк Э. П. Глобализация информационного пространства и человечество // НТИ. Серия 1. – 2015. – № 1. – С. 1–13.

10. Карпик А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 259 с.

11. Кацко С. Ю. Национальные геоинформационные пространства // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 106–109.

12. Лисицкий Д. В., Кацко С. Ю. Пользовательский сегмент единого территориального геоинформационного пространства // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 58–70.

13. Мороз О. Н., Шадринцева А. Н. Государственно-частное партнёрство в сфере регионального туризма // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 124–132.

14. Максанова Л. Б.-Ж., Санжеев Э. Д., Будаева Д. Г. Территориальная организация туристско-рекреационной деятельности на региональном уровне: теоретические и практические аспекты // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 128–146.

15. Робинсон Б. В., Ушакова Е. О. Вопросы повышения эффективности управления региональными ресурсами развития туризма // Вестник СГУГиТ. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 63–71.

16. Жарников В. Б., Конева А. В. О проблеме кадастра туристских ресурсов и его основном содержании // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 148–155.

17. Кохановская И. И., Левицкая Н. Е. Создание единого информационного пространства для совершенствования государственной политики в сфере туризма в Республике Крым // Вестник Государственного университета управления. – 2017. – № 12. – С. 3–11.

18. Яркин А. С. Единое туристическое информационное пространство Алтайского края как элемент социокультурного пространства региона // Информация и образование: границы коммуникаций. – 2013. – № 5 (13). – С. 252–253.

19. Ромадонова М. М. Информационный менеджмент и информационные системы – важность в развитии туризма // Архивариус. – 2016. – Т. 1, № 4 (8). – С. 91–94.

20. Бешенцев А. Н. Геоинформационные ресурсы: особенности, классификация, размещение // Информационные ресурсы России. – 2015. – № 4. – С. 21–26

Получено 07.09.2018

© А. Н. Бешенцев, Д. Г. Будаева, Э. Д. Санжеев,
А. А. Лубсанов, Т. А. Борисова, Э. А. Батоцыренов, 2018

ESSENCE AND MAPPING OF TOURIST-RECREATIONAL INFORMATION SPACE: THE COAST OF LAKE BAIKAL

Andrew N. Beshentsev

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, 670031, Russia, D. Sc., Professor of RAS, Head of laboratory, phone: (3012)43-36-76, e-mail: abesh@mail.ru

Darima G. Budaeva

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, 670031, Russia, Ph. D., Leading Engineer, phone: (3012)43-36-76, e-mail: budaevadarima@yandex.ru

Erdeni D. Sanzheev

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, 670031, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (3012)43-36-76, e-mail: esanzheev@gmail.com

Alexander A. Lubсанов

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, 670031, Russia, Leading Engineer, phone: (3012)43-36-76, e-mail: alub@binm.ru

Tatyana A. Borisova

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, 670031, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (3012)43-36-76, e-mail: tabor@binm.ru

Edward A. Batotsyrenov

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, 6, Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, 670031, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (3012)43-36-76, e-mail: edikbat@gmail.com

The article formulates the scientific principles of the tourist and recreational information space (TRIS) as a phenomenon caused by modern informatization of territorial activities, the peculiarity of which is the creation and use of spatially coordinated resources describing natural and socio-economic objects and processes of interest for tourism and recreation. The organizational block diagram of TRIS is presented and basic information flows forming space are established. The analysis of TRIS components is carried out, the specificity of its territorial, social, functional and regulatory structure is disclosed. The process of information interaction in the sphere of tourism and recreation is considered, sources and features of information resources of tourist and recreational subjects are determined, their content and conditions of accommodation are determined. On the example of the TRIS coast of the lake Baikal was developed a methodical basis for mapping information infrastructure and practice-oriented example of the map.

Key words: subjects of the tourism industry, information resources, information infrastructure, tourist and recreational information space, mapping.

REFERENCES

1. Federal law of November 24, 1996 No. 132–FZ (last edition). On the fundamentals of tourist activity in the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
2. Presidential Order of the Russian Federation of February 7, 2008 No. Pr–212. Strategy of Information Society Development in the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. Resolution of the State Standard of the Russian Federation of 7 October 1999 No. 334–st. Interstate standard GOST 7.0-99 "System of standards for information, librarianship and publishing.

Information and library activities, bibliography. Terms and definitions". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

4. Semenyuk, E. P. (1988). *Informacionnyj podhod k poznaniyu dejstvitel'nosti [Information approach to the cognition of reality]*. Kiev: Naukova dumka Publ., 239 p. [in Russian].

5. Serbenyuk, S. N. (1989). Cartography and geoinformatics – their interaction. *Vestnik MGU [Bulletin MGU]*, 5, 3–8 [in Russian].

6. Semenyuk, E. P. (1997). The development of the information space and the progress of society. *Nauchno-tehnicheskaya informatsiya. Seriya 1 [Scientific and Technical Information. Series 1]*, 1, 1–12 [in Russian].

7. Tikunov, V. S., & Capuk, D. A. (1999). *Sustainable development of territories: cartographic and geoinformation support [Ustojchivoe razvitie territorij: kartografo-geoinformacionnoe obespechenie]*. Smolensk: SGU Publ., 176 p. [in Russian].

8. Laishevskaya, R. R. (2005). Comprehension of the meaning of a single information space through definitions information, information environment, information space. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv [Bulletin of the Kazan State University of Culture and Arts]*, 3, 198–202 [in Russian].

9. Semenyuk, E. P. (2015). Globalization of the information space and humanity. *Nauchno-tehnicheskaya informatsiya. Seriya 1 [Scientific and Technical Information. Series 1]*, 1, 1–13 [in Russian].

10. Karpik, A. P. (2004). *Methodological and technological fundamentals of geoinformation support of territories [Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformacionnogo obespecheniya territorij]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 259 p. [in Russian].

11. Kacko, S. Yu. (2016). National Geoinformation Spaces. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 106–109). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

12. Lisickij, D. V., & Kacko, S. Yu. (2016). The user segment of a single territorial geoinformation space. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 124–132 [in Russian].

13. Moroz, O. N., & Shadrinceva, A. N. (2015). Public-private partnership in the sphere of regional tourism. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(30), 58–70 [in Russian].

14. Maksanova, L. B., Sanzheev, E. D., & Budaeva, D. G. (2017). Territorial organization of tourist and recreational activities at the regional level: theoretical and practical aspects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 128–146 [in Russian].

15. Robinson, B. V., & Ushakova, E. O. (2013). Issues of improving the efficiency of regional tourism development resources management. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 4(24), 63–71 [in Russian].

16. Zharnikov, V. B., & Koneva, A. V. (2017). About the problem of the cadastre of tourist resources and its main content. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 148–155 [in Russian].

17. Kohanovskaya, I. I., & Levickaya, N. E. (2017). Creation of a common information space for improving the state policy in the sphere of tourism in the Republic of Crimea. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta upravleniya [Vestnik of the State University of Management]*, 12, 3–11 [in Russian].

18. Yarkin, A. S. (2013). Single tourist information space of the Altai Territory as an element of the socio-cultural space of the region. *Informaciya i obrazovanie: granicy kommunikacij [Information and Education: the Boundaries of Communications]*, 5(13), 252–253 [in Russian].

19. Romadonova, M. M. (2016). Information management and information systems - the importance in the development of tourism. *Arhivarius [Archivist]*, 4(8), 91–94 [in Russian].

20. Beshencev, A. N. (2015). Geoinformation resources: features, classification, location. *Informacionnye resursy Rossii [Information Resources of Russia]*, 4, 21–26 [in Russian].

Received 07.09.2018

© A. N. Beshentsev, D. G. Budaeva, E. D. Sanzheev,
A. A. Lubsanov, T. A. Borisova, E. A. Batotsyrenov, 2018

УДК 528.92:004.4

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ KEPLER.GL ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АНАЛИЗА БОЛЬШИХ НАБОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Петр Юрьевич Бугаков

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (383)343-18-53, e-mail: peter-bugakov@yandex.ru

Станислав Юрьевич Кацко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (383)343-18-53, e-mail: s.katsko@ssga.ru

Андрей Александрович Басаргин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (383)343-18-53, e-mail: kaf.pi@ssga.ru

Евгений Юрьевич Воронкин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (383)343-18-53, e-mail: evgeney.voron@gmail.com

В настоящее время идет активное развитие мультимедийного направления в картографическом отображении больших наборов пространственных данных. Решаются задачи, связанные с формированием геоинформационного пространства, анализа больших наборов пространственных данных и их отображения средствами цифровой веб-картографии.

Целью данной статьи является анализ функциональных возможностей веб-приложения Kepler.gl, предназначенного для визуализации и анализа больших наборов пространственных данных. На данном этапе развития Kepler.gl позволяет работать с данными, сохраненными в одном из трех открытых текстовых форматов: CSV, JSON или GeoJSON.

Для практической апробации основных функций программы была создана карта автобусных и трамвайных остановок г. Новосибирска. В качестве источника геоданных был взят shp-файл из открытого набора Open Street Map на территорию Сибирского федерального округа.

По результатам апробации некоторых функциональных возможностей можно сделать вывод, что Kepler.gl позволяет заметно упростить процесс анализа и визуализации больших наборов данных. В большей степени это обеспечивается графическим интерфейсом, который содержит интуитивно понятные инструменты для выбора способа отображения данных, их фильтрации и агрегирования, наложения сведений из различных источников, переключения между 2D- и 3D-режимами и др.

Ключевые слова: визуализация, пространственные данные, большие данные, геоинформация, тематическая карта, слои карты, агрегирование данных, веб-приложение.

Введение

В настоящее время идет активное развитие мультимедийного направления в картографическом отображении больших наборов пространственных данных. Наблюдается связь между совершенствованием систем управления пространственными данными и эволюцией специализированного программного обеспечения. Этому посвящены ряд научных публикаций и монографий как российских авторов, так и их зарубежных коллег [1–15].

В указанных работах рассмотрены вопросы, связанные с формированием геоинформационного пространства, анализом больших наборов пространственных данных и их отображением средствами цифровой веб-картографии.

Применение программного обеспечения Kepler.gl для анализа пространственных данных

Проект Kepler.gl представляет собой высокопроизводительное веб-приложение, способное оперативно создавать интерактивные тематические карты. Изначально данный инструмент создавался командой Uber Engineering для аналитиков компании с целью визуализации и изучения дорожного движения в городах по всему миру. Источником геоинформационных данных служили автомобили компании, оборудованные таксометрами с GPS. Однако в мае 2018 г. компания открыла доступ к приложению Kepler.gl и предоставила общественности весь его исходный код. В настоящее время все материалы по проекту опубликованы на платформе GitHub, что дает возможность сторонним разработчикам участвовать в развитии Kepler.gl. Обычные пользователи могут воспользоваться веб-приложением по адресу <http://Kepler.gl> или установить себе локальную версию, следуя инструкциям, приведенным на GitHub.

Программный продукт Kepler.gl был создан на основе библиотеки визуализации данных deck.gl, разработанной компанией Uber Data Visualization с использованием WebGL и react-mapbox-gl. Для управления данными в программном обеспечении используется технология Redux, что позволяет разработчикам встраивать Kepler.gl в любое React-Redux приложение.

Все операции (агрегация, фильтрация и отображение данных), производимые в приложении, осуществляются на аппаратном уровне на стороне клиента. Такой подход требует высокой производительности графической подсистемы компьютера пользователя, но позволяет обрабатывать большое количество данных за короткое время.

На данном этапе развития Kepler.gl позволяет загружать исходные данные, сохраненные в одном из трех открытых текстовых форматов: CSV, JSON или GeoJSON. Все три формата позволяют хранить данные в структурированном виде и могут быть легко прочитаны человеком. В отличие от первых двух универсальных форматов, GeoJSON предназначен для хранения географических структур данных: точечных, линейных и полигональных объектов, а также па-

раметров их визуализации. Для быстрого ознакомления с приложением разработчики предоставили пользователю 9 готовых наборов тестовых данных. Примером может служить карта поездок на такси в Нью-Йорке с фильтром, представленным в виде временной шкалы (рис. 1).



Рис. 1. Пример визуализации тестового набора данных

Поскольку все взаимодействие с приложением осуществляется через интернет-браузер, к загружаемым данным предъявляются ограничения по объему. Так, при использовании браузера Chrome файл с исходными данными не должен превышать 250 Мб, в то же время Safari такие ограничения не накладывает.

Рассмотрим функциональные возможности Kepler.gl более подробно. Приложение поддерживает 10 типов визуализации слоев (рис. 2), каждый из которых имеет свой набор настраиваемых параметров:

- точки (Point);
- дуги (Arc);
- линии (Line);
- сетка (Grid);
- гексагональная сетка (Hexbin);
- полигоны (Polygon);
- кластеры (Cluster);
- иконки (Icon);
- тепловая карта (Heatmap);
- гексагональная сетка H3 (H3HexGrid).

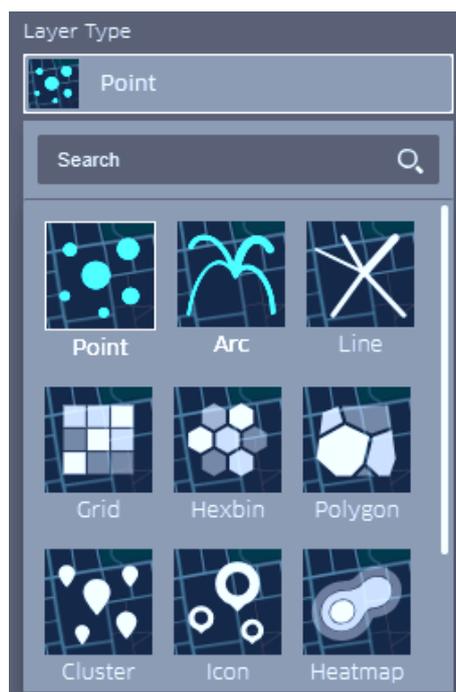


Рис. 2. Меню выбора типа визуализации слоя данных

Сетка, гексагональная сетка, кластер и тепловая карта позволяют выполнять агрегацию данных. Способ агрегации зависит от выбранного типа визуализации данных. Пример использования слоя Arc (см. рис. 1).

Kepler.gl не ограничивает число слоев, используемых при отображении исследуемого набора данных. При этом даже слои одинакового типа, отображающие одни и те же данные, могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от выбранных настроек.

На карте порядок слоев задается списком, расположенным на первой вкладке Layers главной панели пользовательского интерфейса. При наличии нескольких слоев способ их наложения настраивается с помощью параметра «Layer Blending». Он является единым для всех слоев. В настоящее время доступны три значения этого параметра:

- Normal – нижние слои не влияют на цвет объектов, расположенных на верхних слоях;
- Additive – цвет области пересечения объектов, расположенных на разных слоях, складывается из значений цвета самих объектов;
- Subtractive – в области пересечения объектов, расположенных на разных слоях, цвет вычисляется как разность значений их цветов.

Методы Additive и Subtractive удобны для выявления областей высокой плотности, которые в данном случае будут более светлыми (в первом случае) или темными (во втором).

Веб-приложение Kepler.gl позволяет выполнять фильтрацию данных по одному или нескольким критериям (вкладка Filters на панели инструментов).

В случае, если фильтрация идет по количественному показателю, программа автоматически строит шкалу значений, которую можно вывести в область карты (см. рис. 1). Такая функциональная возможность существенно повышает интерактивность получаемого картографического произведения. На вкладке *Interactions* пользователю предоставляется возможность настроить набор отображаемой семантической информации о выбранных объектах на карте. Последняя вкладка на панели инструментов (*Base map*) содержит настройки стиля карты и отображения базовых слоев.

Кроме двумерных карт пользователь также может создавать объемные визуализации для обработки данных, поддерживающих высоту точки или сложные пространственные фигуры в изометрической перспективе.

Для практической апробации основных функций программы было решено создать карту автобусных и трамвайных остановок г. Новосибирска. В качестве источника геоданных был взят *shp*-файл из открытого набора *Open Street Map* на территорию Сибирского федерального округа.

Перед загрузкой данных в приложение *Kepler.gl* потребовалась их предварительная подготовка. Она заключалась в создании дополнительных полей *Lng* и *Lat* для хранения географических координат остановок общественного транспорта, представленных в виде точечных объектов, а также транслировании *shp*-файла в формат *CSV*. Все этапы подготовки данных были выполнены средствами ГИС *MapInfo 11.5*.

Загрузка данных в *Kepler.gl* осуществляется с помощью диалогового окна «*Add data to map*». Здесь также можно выбрать один из наборов тестовых данных, предоставляемых разработчиками приложения. Стоит отметить, что при добавлении новых данных *Kepler.gl* попытается автоматически определить поля, содержащие координаты объектов, и подобрать наиболее подходящий тип визуализации слоя. Если названия полей или их тип данных не совпадают с ожидаемыми, пользователю придется создать и настроить слой вручную.

В нашем случае приложение корректно определило поля с координатами объектов и автоматически построило точечный слой. Для дальнейшей настройки визуализации потребовалось изменить минимальный радиус пунсонов, а также задать параметры их цветового обозначения в зависимости от типа остановок, указанного в поле *Fclass* (рис. 3, *а*). Для отображения только автобусных и трамвайных остановок были установлены параметры фильтра, показанные на рис. 3, *б*. Выбор семантических данных для отображения в информационном окне карты производился на вкладке *Interactions* (рис. 3, *в*). После выполненных настроек карта приобрела вид, показанный на рис. 4.

Однако в таком варианте карта пока еще не очень информативна. Создадим слой «Тепловая карта» для получения наглядного представления о плотности транспортных узлов в городе.

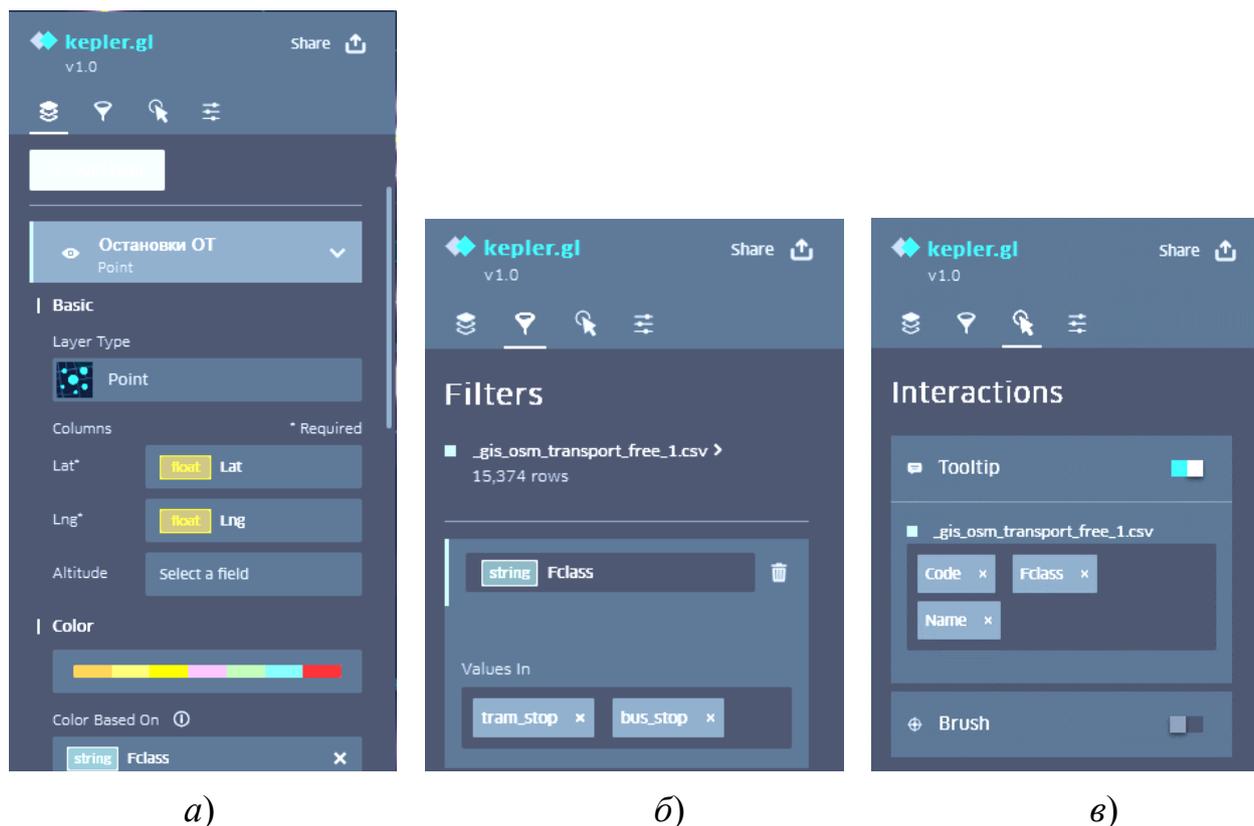


Рис. 3. Настройки визуализации (а), фильтрации (б) и отображения семантической информации (в)

В качестве исходных данных для нового слоя будет использован уже загруженный файл CSV. При создании нового слоя визуализации укажем поля с координатами вручную. Чтобы объекты слоя не мешали обзору дорожной сети, установим значение параметра прозрачности *Opacity* на 0,32. Выберем цветовую шкалу, наиболее подходящую под общее цветовое оформление карты. По умолчанию агрегация данных в слое «Тепловая карта» выполняется по количеству точечных объектов на единицу площади, что полностью отвечает требованиям решаемой задачи.

Стоит отметить, что при использовании других типов визуализации слоев методы агрегации будут иными. Например, тип «Сетка» поддерживает 5 вариантов агрегации числовых данных:

- average (среднее значение);
- maximum (наибольшее значение);
- minimum (наименьшее значение);
- median (медиана);
- sum (сумма).



Рис. 4. Результат настройки визуализации карты

В результате выполненных операций карта примет вид, показанный на рис. 5.



Рис. 5. Результат визуализации карты с агрегацией данных

Выводы

По результатам апробации некоторых функциональных возможностей можно сделать вывод, что Kepler.gl, не требуя от пользователя знаний в области программирования и дизайна, позволяет заметно упростить процесс анализа и визуализации больших наборов данных. В большей степени это обеспечивается графическим интерфейсом, который содержит интуитивно понятные инструменты для выбора способа отображения данных, их фильтрации и агрегирования, наложения сведений из различных источников, переключения между 2D и 3D режимами и др.

В дальнейшем разработчики планируют реализовать поддержку сводных таблиц для более детальных исследований, а также улучшить быстродействие приложения при работе с большими объемами геопространственных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ больших объемов данных [Электронный ресурс] // Технологии анализа данных BASEGROUP LABS. – Режим доступа : <https://basegroup.ru/community/articles/very-large-data> (дата обращения: 01.09.2018).
2. Бугаков П. Ю. Принципы картографического отображения трехмерных моделей местности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 3. – С. 156–161.
3. Визуализация данных [Электронный ресурс] // Tadviser. – Режим доступа : https://http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Визуализация_данных (дата обращения: 01.09.2018).
4. Карпик А. П., Лисицкий Д. В. Электронное геопространство – сущность и концептуальные основы // Геодезия и картография. – 2009. – № 5. – С. 41–44.
5. Карпик А. П., Осипов А. Г., Мурзинцев П. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе : монография. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 280 с.
6. Кацко С. Ю. Возможности информационно-аналитических ГИС в работе непрофессиональных пользователей с пространственной информацией // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 1 (14). – С. 76–80.
7. Лисицкий Д. В., Бугаков П. Ю., Нгуен Ань Тай. Трехмерная компьютерная картография : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 179 с.
8. Лисицкий Д. В., Комиссарова Е. В., Колесников А. А. Теоретические основы и особенности мультимедийной картографии // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 72–87.
9. Лисицкий Д. В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая Земля» к системе виртуальной геореальности // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 8–16.
10. Лисицкий Д. В., Хорошилов В. С., Бугаков П. Ю. Картографическое отображение трехмерных моделей местности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 98–102.
11. Мультимедийное направление в картографии / Д. В. Лисицкий, А. А. Колесников, Е. В. Комиссарова, П. Ю. Бугаков, В. С. Писарев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 3. – С. 40–44.
12. Ромичева Е. В. Методы обработки и визуализации больших данных // Аллея науки. – 2017. – Т. 3, № 16. – С. 976–982.
13. Хорошилов В. С., Кацко С. Ю. Геоинформационное пространство и виртуальная географическая среда // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 256–260.

14. Bill Franks. Taming the big data tidal wave: finding opportunities in huge data streams with advanced analytics. – John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 336 p.

15. Dr. Arvind Sathi. Big Data Analytics: Disruptive Technologies for Changing the Game. – First Edition. – MC Press Online, LLC, 2012. – 98 p.

Получено 12.11.2018

© П. Ю. Бугаков, С. Ю. Кацко,
А. А. Басаргин, Е. Ю. Воронкин, 2018

ANALYSIS OF THE FUNCTIONALITY OF THE WEB APPLICATION KEPLER.GL FOR VISUALIZING AND ANALYZING OF LARGE SPATIAL DATASETS

Petr Yu. Bugakov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Systems, phone: (383)343-18-53, e-mail: peter-bugakov@ya.ru

Stanislav Yu. Katsko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Systems, phone: e-mail: s.katsko@ssga.ru

Andrei A. Basargin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Systems, phone: (383)343-18-53, e-mail: abaspirant@mail.ru

Evgeniy Yu. Voronkin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant, Department of Applied Informatics and Information Systems, phone: (923)127-58-86, e-mail: evgeny.voron@gmail.com

Currently, there is an active development of the multimedia direction in the cartographic display of large sets of spatial data. The tasks associated with the formation of geo-information space, the analysis of large sets of spatial data and their display by means of digital web-cartography are being solved.

The goal of this article is to analyze the functionality of the Kepler.gl web application designed to visualize and analyze large sets of spatial data. At this stage of development, Kepler.gl allows you to work with data stored in one of three open text formats: CSV, JSON or GeoJSON.

For practical testing of the main program functions, a map of bus and tram stops in the city of Novosibirsk was created. As a source of geodata, a shp-file was taken from the Open Street Map open set to the territory of the Siberian Federal District.

Based on the results of testing some of the functionalities, it can be concluded that Kepler.gl makes it possible to significantly simplify the process of analyzing and visualizing large data sets. To a greater extent, this is provided by a graphical interface, which contains intuitive tools for choosing how to display data, filter and aggregate data, overlay information from various sources, switch between 2D and 3D modes, etc.

Key words: visualization, spatial data, large set of data, geoinformation, thematic map, map layers, data aggregation, web-application.

REFERENCES

1. Analysis of large amounts of data. Data Analysis Technologies BASEGROUP LABS. Retrieved from <https://basegroup.ru/community/articles/very-large-data> [in Russian].
2. Bugakov, P. Yu. (2012). Principles of cartographic mapping of three-dimensional terrain models. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 156–161). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Data Visualization. Tadviser. Retrieved from http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Визуализация_данных [in Russian].
4. Karpik, A. P., & Lisitsky, D. V. (2009). Electronic geographic environment - essence and concept. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 5, 41–44 [in Russian].
5. Karpik, A. P., Osipov, A. G., & Murzintsev, P. P. (2010). *Upravlenie territoriei v geoinformatsionnom diskurse [Territory Management in geoinformation discourse]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 280 p. [in Russian].
6. Katsko, S. Yu. (2011). The potential of information and analytical GIS for the work of non-professional users with spatial information. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(14), 76–80 [in Russian].
7. Lisitsky, D. V., Bugakov, P. Ju., & Nguen, An Taj. (2016). *Trehmernaja komp'yuternaja kartografija [Three-dimensional computer cartography]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 179 p. [in Russian].
8. Lisitskiy, D. V., Komissarova, E. V., Kolesnikov, A. A. (2017). Theoretical bases and features of multimedia cartography. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 72–87 [in Russian].
9. Lisitsky, D. V. (2013). Prospects for the development of cartography: from the system "Digital Earth" to the virtual system geo-reality. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 2(22), 8–16 [in Russian].
10. Lisitsky, D. V., Khoroshilov, & V. S., Bugakov. (2012). Cartographic visualization of three-dimensional terrain models. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 98–102 [in Russian].
11. Lisitsky, D. V., Kolesnikov, A. A., Komissarova, E. V., Bugakov, P. Ju., & Pisarev, V. S. (2014). Multimedia direction in cartography. *Izvestia vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 3, 40–44 [in Russian].
12. Romicheva, E. V. (2017). Methods of processing and visualization of big data. *Science Alley*, 3(16), 976–982.
13. Khoroshilov, V. S., & Katsko, S. Yu. (2015). Geoinformation environment and virtual geographical environment. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, S/5, 256–260 [in Russian].
14. Bill Franks. (2012). *Taming the big data tidal wave: finding opportunities in huge data streams with advanced analytics*. John Wiley & Sons, Inc., 336 p.
15. Dr. Arvind Sathi. (2012). *Big Data Analytics: Disruptive Technologies for Changing the Game* (1st ed.). MC Press Online, LLC, 98 p.

Received 12.11.2018

© P. Yu. Bugakov, S. Yu. Katsko,
A. A. Basargin, E. Yu. Voronkin, 2018

УДК 528.92:004.4

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Сергей Романович Горобцов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)471-55-67, e-mail: sergey@gorobtsov.com

Александр Викторович Чернов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ассистент кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (913)743-09-79, e-mail: avch-1011@mail.ru

В статье рассмотрены современные тенденции геопространственного развития городских территорий в рамках стратегии пространственного развития России. В современных условиях для снижения урбанизационной нагрузки на окружающую среду и городские службы в мире успешно реализуется концепция «Умный город», целью которой является не только повысить эффективность работы всех городских служб (путем автоматизации процессов, систематизации проблем, эффективного распределения ресурсов городских служб и т. п.), но и сделать город более безопасным и комфортным для жителей. Поэтому современные подходы к пространственному развитию городов играют ключевую роль в эффективном использовании и развитии городской среды. В качестве инструментальных средств для создания цифровых трехмерных моделей объектов и инфраструктуры городов успешно применяются лазерные сканеры и беспилотные летательные аппараты. Для интеграции всевозможных ресурсов с решением проблем, стоящих перед обществом, используются цифровые платформы. В работе в качестве такой платформы рассмотрен программный комплекс Autodesk InfraWorks.

В качестве примера современного решения по управлению и пространственному развитию территории мегаполиса на едином геопространстве в рамках концепции «Умный город» приведена трехмерная модель объекта недвижимости «Бугринский мост», полученная СГУГиТ при проведении мониторинга вертикального перемещения торца затяжки пролетного строения в процессе его надвигки.

Ключевые слова: умный город, 3D-модель, лазерное сканирование, облако точек, 3D-кадастр, кадастровая модель, пространственная модель, геопространственные данные.

Введение

Современной тенденцией развития общества является значительное увеличение темпа урбанизации, что в совокупности с ограниченностью городских территорий приводит к уплотнению и укрупнению вертикальной застройки, развитию подземного строительства, а также появлению большого количества разновысотных объектов инфраструктуры для комфортного проживания граждан.

Решения, принимаемые органами власти и архитектуры при планировании размещения таких объектов и дальнейшего развития территории, оказывают прямое воздействие на проектирование дорожной сети, регулирование и опти-

мизацию транспортных потоков, создание комфортной городской среды и, в конечном итоге, на уровень жизни населения.

В современных условиях развитие мегаполисов в формате концепции «Умный город» невозможно без создания высокоточных геопространственных моделей объектов инфраструктуры городов на цифровой платформе. Наличие такой модели современного города позволяет с помощью BIM-технологий решать широкий круг задач для эффективного пространственного развития и управления территориями.

Умный город – система управления ресурсами и инфраструктурой города, основанная на применении инновационных технологий, которые предусматривают эффективное и рациональное использование городских систем жизнедеятельности [1].

Анализируя мировой опыт создания «умных городов» [2, 3], можно выделить несколько государств, добившихся значительных успехов в реализации данной концепции, а именно: Великобритания – создана специальная организация Future Cities Catapult, разработавшая и внедрившая умную модель г. Лондона; Финляндия – запроектирована и введена в эксплуатацию система умной логистики транспорта с учетом экологии; Южная Корея – определены показатели экономической эффективности строительства крупного транспортного узла на основе расчета параметров пассажиропотоков. Также стоит отметить наличие специализированных рабочих групп, представляющих данные страны, и экспертов из Германии и США, которые проводят исследования по внедрению «умных городов» в Китае, Индии, Малайзии, Сингапуре и ряде других стран.

Изучение положительного опыта указанных стран помогло выявить ряд условий, которые позволили осуществить внедрение систем (элементов систем) умных городов:

- 1) наличие единой цифровой геопространственной модели на городскую территорию;
- 2) развитая сфера BIM-технологий (BIM – Building Information Modelling);
- 3) интеграция международного стандарта CityGML [4] в область управления земельными ресурсами и городскими территориями конкретной страны;
- 4) наличие единой цифровой платформы, позволяющей объединять различные умные технологии, а также анализировать и визуализировать существующие данные;
- 5) нормативно-правовая поддержка реализуемых технологических решений.

Наибольший интерес для исследования, на наш взгляд, представляют условия 1 и 3. Следовательно, в статье проанализированы существующие способы получения единых геопространственных моделей городов с применением современного геодезического оборудования и выполнено обоснование предложений по выбору технической платформы для интеграции и визуализации полученных данных в системе «Умный город» на территории России.

Актуальность исследования подтверждается наличием утвержденной программы развития цифровой экономики РФ [5], одним из приоритетных направлений которой является работа с геопространственными данными и развитие «умных городов».

Методы и результаты

Общая схема исследований включает в себя два раздела: выработку предложений по способу трехмерного моделирования городской территории и визуализацию полученных данных в единой программной среде, поддерживаемой стандартом CityGML на основе изучения зарубежного и российского опыта в данной сфере, с приведением примеров.

1. Трехмерное моделирование объектов городской среды (объекты недвижимости, расположенные на разных уровнях: подземном, наземном, надземном)

Основными способами получения достоверных геопространственных 3D-моделей различных типов объектов недвижимости в настоящее время являются: фотограмметрический способ (пилотируемые или беспилотные летательные аппараты), лазерное сканирование (наземное, мобильное и воздушное) и традиционные методы (электронные тахеометры) [6].

В рамках данной статьи авторами подробно рассмотрена технология лазерного сканирования, широко применяемая в различных странах. Вопросы использования технологии лазерного сканирования и традиционных методов для 3D-моделирования городской территории подробно рассмотрены в работах [7, 8].

В настоящее время технологии лазерного сканирования позволяют создавать точные 3D-модели различных объектов недвижимости, дорожных сетей и т. д. [9]. Развитие технологий, а также снижение стоимости оборудования и автоматизация обработки результатов съемки позволяют использовать их в самых различных сферах [10].

В режиме лазерного сканирования используется сканер LiDAR (Light Detection and Ranging), который захватывает миллионы точек данных при сканировании на основе принципа поглощения и рассеивания света от окружающих объектов. Далее, точки данных преобразуются в облака точек, которые могут быть использованы для создания реалистичных 3D моделей зданий или городских территорий с последующим применением в различных сферах умного города (например, инжиниринг, мониторинг, оптимизация визуального контроля и доступа к модели здания для минимизации числа обслуживающего персонала и т. д.). Основными преимуществами этого способа являются быстрая скорость получения моделей с высокой степенью достоверности, а также широкий охват территории вокруг сканируемых объектов [11].

В зависимости от типа, площади и степени необходимой детализации моделируемых объектов выделяют три основных вида лазерного сканирования: наземное (НЛС), мобильное (МЛС) и воздушное (ВЛС).

При наземном лазерном сканировании съемка выполняется с поверхности земли в дискретном режиме (т.е. с перестановкой прибора). Данный метод можно применять в закрытых помещениях и средах (тоннели, пещеры). Наземное лазерное сканирование идеально подходит для сложных сооружений и внутренних съемок [12]. По мнению авторов, приведенный способ не может рассматриваться в качестве основного при создании единой пространственной модели городской территории, а является дополняющим при необходимости моделирования плотно застроенных частей территории с большим количеством разноуровневых объектов, выступающих конструктивных элементов и пр.

После обработки трехмерные модели городской территории, полученные с помощью НЛС, используются в различных сферах, в том числе при решении земельных споров. Подобный подход реализован в Сингапуре: после выполнения сканирования на полученное облако точек накладываются кадастровые границы объектов недвижимости, которые хранятся в 2D-формате, поэтому границы появляются с нулевыми z-координатами; далее, с помощью метода экструзии, они поднимаются по высоте и преобразуются в 3D-объекты, каждому из которых присваивается отдельный цвет; после преобразования объекты, которые могут накладываться на соседний участок, могут быть легко идентифицированы. Если объект пересекает вертикальную плоскость кадастровых границ, то он рассматривается как объект земельного спора [13].

Кроме того, данные облаков точек, полученные с помощью лазерного сканирования, позволяют пользователю визуализировать, идентифицировать и извлекать необходимую информацию об объекте недвижимости. Сущность данного метода продемонстрирована на рис. 1.



Рис. 1. Применение НЛС в кадастре Сингапура

Рассматривая особенности мобильного лазерного сканирования, стоит отметить, что съемка выполняется с наземного или водного носителя в непрерывном режиме. Метод допускает ограниченное кратковременное пребывание в закрытых средах и применяется для 3D-моделирования линейных инфраструктурных объектов (автомобильные и железные дороги, линии электропередачи, улицы городов), площадных объектов сложной формы и высокой детальности (населенные пункты, развязки и эстакады в несколько уровней), при условии обеспечения возможности беспрепятственного проезда ко всем моделируемым объектам. МЛС является источником дополнительной информации о территории (в большинстве случаев – модели протяженных объектов) и может применяться для детализации некоторых объектов при выполнении воздушного лазерного сканирования.

Использование воздушного лазерного сканера для съемки городских территорий является современным и самым продуктивным способом получения высокоточных пространственных данных [14]. По своей производительности этот метод превышает традиционные виды съемки в 20 и более раз, что дает возможность сокращать сроки выполнения работ и существенно снижать их стоимость. Наибольшая эффективность моделирования геометрических конструкций объектов городской инфраструктуры достигается при объединении наборов данных воздушного, наземного и мобильного лазерного сканирования (что взаимоисключает существующие недостатки каждого из типов сканирования).

Обязательным условием моделирования на основе комбинированных наборов данных является корректная привязка облаков точек с помощью итеративного алгоритма ближайших точек (ICP). Итеративный алгоритм ближайших точек – это алгоритм, использующийся для сведения к минимуму разницы между двумя или более облаками точек. Различие вызвано тем, что датчики сканеров имеют различный уровень точности, особенно с точки зрения их горизонтальной точности для точек, которые они собирают в процессе сканирования.

Для обработки облаков точек и моделей с открытым исходным кодом, который включает в себя реализацию алгоритма ICP, используется следующее программное обеспечение: Leica Cyclone, MeshLab, CloudCompare, Point Cloud Library [15].

3D-модель, созданная на основе комбинированного облака точек из ВЛС, НЛС и МЛС, соответствует требованиям высокой точности (порядка первых сантиметров) для различных сфер «умного города», например, для мониторинга деформаций объектов капитального строительства с течением времени [16].

Наглядным примером использования совокупности методов лазерного сканирования для создания единой трехмерной модели городов Куала-Лумпур и Путраджайа является проект SmartKADASTER, реализованный департаментом по изучению и составлению карт Малайзии (JUPEM) [17].

3D модель городов была построена на основе обработки нескольких рабочих процессов. Совокупность данных ВЛС, МЛС, НЛС была преобразована в документ формата XML. Далее была определена геопозиция для каждого эле-

мента наборов данных, и, наконец, весь процесс был автоматизирован для создания текстурированных 3D-моделей, а затем преобразован в формат 3DML. Пользователь может просмотреть 3D-модели городов с помощью программного обеспечения Skyline Terra Explorer.

Кроме того, с помощью программного обеспечения Leica TruView, которое позволяет пользователю взаимодействовать с облаком точек в режиме реального времени, можно свободно перемещаться по данным «изнутри» (indoor-навигация). Приложение позволяет просматривать необходимое здание или объект как в 3D-, так и 2D-представлении. Снимок экрана облака точек с нанесенными текстурами, 3D-модели и 2D-схемы отдельного здания представлены на рис. 2.

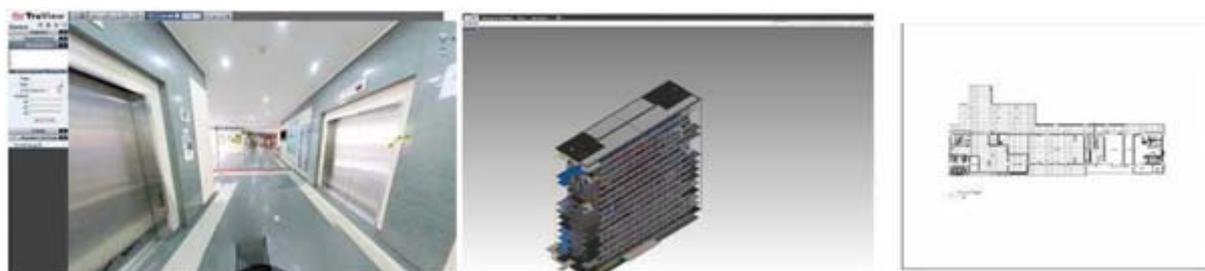


Рис. 2. Спецификации здания в системе SmartKADASTER

Авторами был проведен сравнительный анализ методов 3D-моделирования объектов недвижимости с использованием НЛС, ВЛС и МЛС, представленный в таблице.

Сравнительный анализ методов 3D-моделирования объектов недвижимости

Параметр (включая детализацию)		Лазерное сканирование		
		НЛС	ВЛС	МЛС
а)	подземный уровень	+	-	-
	надземный, надземный уровень	+	+	+
	совокупность уровней	+	+	-
б)	отдельно стоящий объект	+	-	-
	линейные объекты	-	-	+
	квартал	-	+	-
	город	-	+	-
в)	наличие большого количества нависающих элементов	+	-	-
	ограниченный доступ к объекту	-	-	-
	наличие растительности, ограничивающей видимость	+	+	-

Параметр (включая детализацию)		Лазерное сканирование		
		НЛС	ВЛС	МЛС
г)	в плане (эксперимент)	0,058 м	0,090 м	нет данных
	по высоте (эксперимент)	0,017 м	0,160 м	нет данных
д)	LoD 0 – LoD 2	+	+	+
	LoD 3	+	+	-
	LoD 4	-	-	-
е)	время сбора данных, не включая координирование сканерных позиций/пунктов ПВО	2 часа (Leica ScanStation C10)	нет данных	нет данных
	время обработки данных, включая формирование 3D-модели	8 часов (Bentley Microstation)	нет данных	нет данных
ж)	средняя стоимость оборудования, млн руб.	5,0 (снят с производства)	40,0 (RIEGL 1-VUX)	80,0 (RIEGL VMX-250)

На основании данных, рассмотренных в таблице, можно сделать вывод, что наиболее эффективным методом получения единой геопространственной трехмерной модели отдельных объектов недвижимости является наземное лазерное сканирование городских территорий – комбинация воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования. Данное утверждение основано на совокупности существующих конструктивных особенностей различных видов лазерных сканеров и неоднородностью городской среды (объекты капитального строительства находятся на разных уровнях, обладают различной конфигурацией и большим количеством выступающих конструктивных элементов).

Специалистами Сибирского государственного университета геосистем и технологий реализовано большое количество геопространственных трехмерных моделей социальнозначимых и уникальных объектов в различных регионах Российской Федерации.

В качестве примера такого объекта в статье рассмотрена трехмерная модель объекта недвижимости «Бугринский мост» (г. Новосибирск), полученная при проведении мониторинга вертикального перемещения торца затяжки пролетного строения в процессе его надвигки наземным лазерным сканером Leica Scanstation C10.

После процесса сканирования полученное облако точек было обработано в программном обеспечении Leica Cyclone. Обработанное облако точек было предоставлено специалистами СГУГиТ и преобразовано в формат .dwg. В результате работы была получена высокоточная и детальная трехмерная модель объекта недвижимости, представленная на рис. 3.

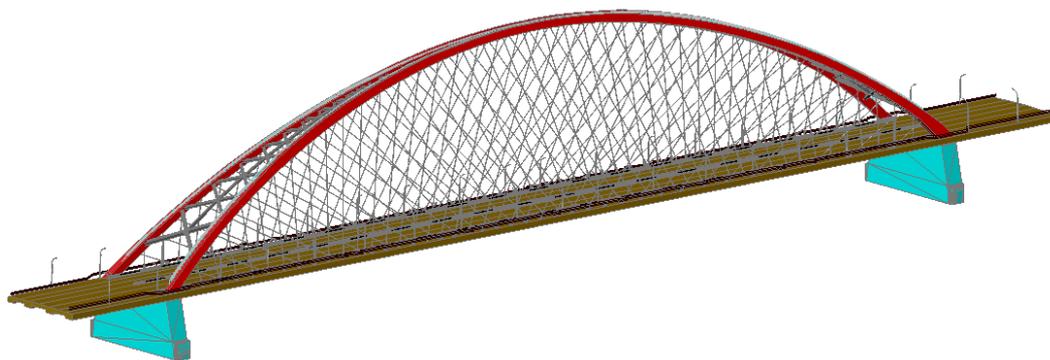


Рис. 3. Трехмерная модель объекта недвижимости «Бугринский мост» в формате .dwg

Полученная трехмерная модель объекта дает возможность получить широкий перечень пространственных характеристик: конфигурация конструкций и элементов, размеры, положение по вертикали и в плане; высоты колонн, длины пролетов, сечения, узлов и иных геометрических параметров, от величины которых будет зависеть наличие деформаций в различных элементах [9].

Указанные параметры могут быть использованы для интеграции объекта недвижимости в геопространство городской территории.

2. Способы интеграции и визуализации пространственных данных

Важной составляющей моделирования геопространства городских территорий и реализации «умного города» является наличие цифровой платформы, которая позволяет интегрировать трехмерные модели, полученные с помощью современных геодезических методов (например, с помощью НЛС), с отдельными компонентами «умного города» и другими видами цифровой информации, необходимой для повышения эффективности планирования и организации территорий.

В настоящее время такие платформы представлены компаниями США, Швеции, Германии и России. Распространенными решениями являются Autodesk InfraWorks, BIM 360, Bentley Microstation и Unigine [18–20], обладающие схожими функциональными возможностями.

На наш взгляд, наиболее простым для восприятия и моделирования городских территорий России является программный комплекс Autodesk InfraWorks. Об этом свидетельствуют следующие факторы:

- программа содержит множество встроенных продуктов, отвечающих за облегченный импорт данных (в том числе полученных в результате лазерного сканирования);

- поддержка интеграции кадастровой и градостроительной информации: кадастровых планов территорий, данных о градостроительном зонировании территории и пр.;

- загрузка существующих 3D-моделей объектов из OpenStreetMap, что облегчает визуализацию и планирование мероприятий по использованию территорий;

- возможность автоматического расчета таких параметров объектов недвижимости, как площадь, протяженность, занесение всей семантической информации об объектах, анализа уклонов, объема земляных работ и пр.;

- автоматическое моделирование дорог и распределения транспортных потоков и др.

Кроме того, большинство существующей проектной документации на объекты капитального строительства создано в Autodesk AutoCAD, что позволяет осуществлять упрощенный импорт/экспорт сведений между программами, а также обеспечена возможность изучения полного функционала программы всеми заинтересованными сторонами (профессиональное сообщество, органы власти, граждане и др.) с помощью бесплатной трехгодовой учебной лицензии, размещенной на официальном сайте компании.

Совокупность представленных факторов предопределила использование программного комплекса Autodesk InfraWorks в рамках выполненной работы по созданию трехмерной модели объекта недвижимости «Бугринский мост».

В рамках технологической схемы выполнения работ, после обработки полученных данных лазерного сканирования и представления модели в виде 3D-модели (формат .dwg) авторами был выполнен импорт модели в Autodesk InfraWorks в системе координат МСК-НСО 4, что соответствует требованиям Единого государственного реестра недвижимости. Следующим шагом стала загрузка данных OpenStreetMap, проектирование дорожной сети и существующих инфраструктурных объектов. Результат моделирования представлен на рис. 4.



Рис. 4. Трехмерная модель объекта недвижимости «Бугринский мост»

Далее были автоматически рассчитаны длина объекта, число опор, строительные характеристики (ширина, глубина опорного листа, подферменной поверхности) и пр. Пример полученных данных в рамках выполненной работы представлен на рис. 5.



Рис. 5. Пример представления аналитических данных

Характерной особенностью полученной модели является большой объем данных, в связи с чем возникает вопрос хранения и быстрой визуализации таких моделей в системах «умных городов». Соответственно, в качестве дальнейших направлений исследований можно выделить поиск решений по формализации полученных результатов в соответствии с международным стандартом CityGML, используемым зарубежными странами для аналогичных видов работ.

Заключение

Анализ современных тенденций в области управления и развития городскими территориями показал, что актуальной задачей является создание систем непрерывного и устойчивого развития городской инфраструктуры на основе применения современных геопространственных технологий – «умные города».

На основе изучения сущности и структуры успешно функционирующих систем «умных городов» зарубежных стран (Великобритания, Финляндия, Южная Корея и Малайзия) выделено пять обязательных условий, обеспечивающих возможность перехода на такие системы, которые представлены в разделе «Введение».

В рамках данной работы особое внимание уделено вопросам создания единой геопространственной трехмерной модели городских территорий с применением методов лазерного сканирования, а также интеграции и визуализации различных типов данных с помощью единой технической платформы (условия 1, 3), представленных в виде теоретических и практических исследований.

В результате анализа тематических примеров создания единых геопространственных моделей различных городов сделан вывод о том, что при использовании в качестве базового метода для получения модели технологии лазерного сканирования наиболее эффективно применять совокупность ВЛС, НЛС и МЛС, что связано со сложностью и неоднородностью городской застройки, большим количеством крыш, навесов и подземных объектов, не позволяющих применять только один метод сканирования.

Рассмотрены два основных вида технических платформ, интегрирующих разнородные пространственные данные: Autodesk InfraWorks и Bentley Microstation, которые соответствуют требованиям стандарта CityGML к представлению и визуализации трехмерных данных на территориях городов. С учетом существующих особенностей и традиций, а также экономической составляющей, для Российской Федерации рекомендовано использовать первый вариант программного обеспечения.

Представленные выводы подкрепляются результатами, полученными в ходе создания геопространственной 3D-модели объекта недвижимости «Бугринский мост», содержащей в себе различные типы данных. Данные выводы могут быть использованы при трехмерном планировании территорий различных муниципальных образований и в качестве основы методики кадастровых работ при переходе Российской Федерации на 3D-кадастр.

Благодарности

Авторы выражают признательность ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» за предоставление материалов лазерного сканирования и проектных сведений объекта недвижимости «Бугринский мост», полученных при проведении мониторинга вертикального перемещения торца затяжки пролетного строения в процессе его надвижки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куприяновский В. П., Буланча С. А., Кононов В. В. Умные города как «столицы» цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies [Электронный ресурс]. – 2016. – Т. 4, № 2. – Режим доступа: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/269/214>.
2. Emily Moir, Tim Moonen, Greg Clark. What are Future cities? Origin, meaning and uses. – London, Catapult Future Cities, Foresight, United Kingdom, 2014. – P. 100.
3. Chandrasekar K. S., Bajracharya B., O'Hare D. A comparative analysis of smart city initiatives by China and India – Lessons for India. – Bond University, Gold Coast, 2016. – P. 20.
4. Open Geospatial Consortium: OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Version 2.0.0, 2012. – 2012.
5. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» (по состоянию на 10.04.2018 г.) : распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р. [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Снежко И. И. Методика расчета точности построения моделей объектов недвижимости в 3D кадастре : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2014. – 140 с.

7. Комиссаров А. В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий : дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2016. – 278 с.
8. Шоломицкий А. А., Лагутина Е. К., Соболева Е. Л. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.
9. Горобцов С. Р. Применение 3D технологий для корректного учета объектов недвижимости // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 127–133.
10. Vetoshkin D. N., Gorobtsov S. R. 3D Monitoring of Fixed Assets under Construction for the Purpose of Consistent Cadastral Registration [Electronic resource] // 2nd International workshop on «Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures and Natural Objects». – Stuttgart, Germany, 2015. – Mode of access : http://www.uni-stuttgart.de/ingeo/news/Technical_Program_Workshop_Stuttgart_2015.pdf.
11. Wan Mohd W. M. N., Abdullah M. A., Hashim S. Evaluation of Vertical Accuracy of Digital Elevation Models Generated from Different Sources : Case Study of Ampang and Hulu Langat, Malaysia [Electronic resource] // FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. – Mode of access : http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts10e/TS10E_wan_mohd_abdullah_et_al_6896.pdf.
12. Khoo V., Low E., and NG Z. H. 3D Laser Scanning to Detect Property Encroachment [Electronic resource] // FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. – Mode of access : https://www.fig.net/resources/proceedings/2014/2014_3dcadastre/3Dcad_2014_03.pdf.
13. Kostov G. Application of 3D Terrestrial Laser Scanning in the Process of Update or Correction of Errors in the Cadastral Map [Electronic resource] // FIG Working Week 2017. Surveying the world of tomorrow – From digitalisation to augmented reality. – Helsinki, Finland, 2017. – Mode of access https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2017/papers/ts01h/TS01H_kostov_8802.pdf.
14. Luo X. Investigating Semi-Automated Cadastral Boundary Extraction From Airborne Laser Scanned Data [Electronic resource]. – Enschede, The Netherlands, 2016. – Mode of access : https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2016/msc/la/luo.pdf.
15. Accuracy of 3D Building Models Created Using Terrestrial and Airborne Laser Scanning Data [Electronic resource] / A. Borkowski, G. Jozkow, M. Ziaja, K. Beczek // FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. – Mode of access : http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts08k/TS08K_borkowski_jozkow_et_al_7003_abs.pdf.
16. Koeva M., Elberink S. O. Challenges for Updating 3D Cadastral Objects using LiDAR and Image-based Point Clouds. [Electronic resource] // 5th International FIG 3D Cadastre Workshop. – Athens, Greece, 2016. – Mode of access : http://www.gdmc.nl/3dcadastres/literature/3Dcad_2016_19.pdf.
17. Cadastral In Supporting Smart Cities In Malaysia. [Electronic resource] / M. N. Isa, C. H. Teng, A. R. Mohd Jazuli, S. Shaharuddin, S. B. Mohd Yusof // FIG Working Week 2017. Surveying the world of tomorrow – From digitalisation to augmented reality. – Helsinki, Finland. 2017. – Mode of access : https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2017/papers/ts06a/TS06A_mohd_noor_chee_hua_et_al_8908.pdf.
18. Сайт компании Autodesk [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.autodesk.com>.

19. Сайт компании Bentley [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.bentley.com>.

20. Сайт компании Unigine [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.unigine.com>.

Получено 01.10.2018

© С. Р. Горобцов, А. В. Чернов, 2018

3D-MODELING AND VISUALIZATION OF URBAN TERRITORIES WITH USE OF MODERN GEODETIC AND PROGRAMMING MEANS

Sergey R. Gorobtsov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, e-mail: sergey@gorobtsov.com

Aleksandr V. Chernov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (913)743-09-79, e-mail: avch-1011@mail.ru

The article considers modern tendencies of urban territorial geospatial development within the framework of spatial development strategy in Russia. In modern conditions in order to decrease urban load onto environment and city services the concept "smart city" is successfully realized all over the world. Its purpose is not only to increase operation efficiency of all city services (process automation, problem classification, efficient distribution of city services' resources etc.), but to make the city more secure and comfortable for its inhabitants. Thus modern approaches to spatial development of cities play a key role in effective use and development of urban environment. As tools for creating digital 3D models of urban objects and infrastructure laser scanners and UAS are successfully used. Digital platforms are used for integration of all kinds of resources to solve problems the society faces. The paper considers the programming complex Autodesk Infracore as a kind of such digital platform. As an example of modern solution in management and spatial development of metropolis territory in geospace within the concept "smart city" is drawn the project realized in SSUGT as the pilot project against the order of Novosibirsk Administration, residential complex "Vostochnij".

Key words: smart city, 3D model, laser scanning, cloud of points, 3D cadastre, cadastral model, spatial model, geospatial data.

REFERENCES

1. Kuprijanovkij, V. P., Bulancha, S. A., & Kononov, V. V. (2016). Smart cities as the «capitals» of the digital economy. *International Journal of Open Information Technologies*, 4(2), 41–51. Retrieved from <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/269/214> [in Russian].
2. Moir, E., Moonen, T., & Clark, G. (2014). *What are Future cities? Origin, meaning and uses*. London, Catapult Future Cities, Foresight, United Kingdom.
3. Chandrasekar, K. S., Bajracharya, B., and O'Hare, D. (2016). *A comparative analysis of smart city initiatives by China and India - Lessons for India*. Bond University, Gold Coast.
4. Open Geospatial Consortium. (2012). *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Version 2.0.0, 2012*.

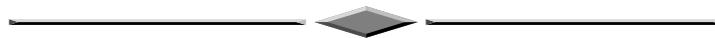
5. Order of the Government of the RF of July 28, 2017 No. 1632-p (as of April 10, 2018). On the approval of the program "Digital Economy of the Russian Federation". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
6. Snezhko, I. I. (2014). Metodika rascheta tochnosti postroeniya modeley ob"ektov nedvizhimosti v 3D kadastre [Method for calculating the accuracy of building models of real estate in the 3D cadastre]. *Candidate's thesis*. Moscow, 140 p. [in Russian].
7. Komissarov, A. V. (2016). Teoriya lazernogo skanirovaniya dlya prostranstvennogo modelirovaniya territorij [Theory and technology of laser scanning for spatial modeling of territories]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Novosibirsk, 278 p. [in Russian].
8. Sholomitskij, A. A., Lagutina, E. K., & Soboleva, E. L. (2017). High Precision Geodetic Measurements at Deformation Monitoring of Aquapark. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3). 45–59 [in Russian].
9. Gorobtsov, S. R. (2015). Application of 3D technologies for the correct registration of real property units. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 4. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodnopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 3. Economic Development of Siberia and the Far East. Enviromental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 127–133). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
10. Vetoshkin, D. N., & Gorobtsov, S. R. (2015). 3D Monitoring of Fixed Assets under Construction for the Purpose of Consistent Cadastral Registration. *Paper presented at the 2nd International workshop on "Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures and Natural Objects"*. Stuttgart, Germany. Retrieved from http://www.uni-stuttgart.de/ingeo/news/Technical_Program_Workshop_Stuttgart_2015.pdf.
11. Wan Mohd, W. M. N., Abdullah, M. A., & Hashim, S. (2014). Evaluation of Vertical Accuracy of Digital Elevation Models Generated from Different Sources: Case Study of Ampang and Hulu Langat, Malaysia. *Paper presented at the FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance*. Kuala Lumpur, Malaysia. Retrieved from http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts10e/TS10E_wan_mohd_abdullah_et_al_6896.pdf.
12. Khoo, V., Low, E., & NG, Z. H. (2014). 3D Laser Scanning to Detect Property Encroachment. *Paper presented at the FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance*. Kuala Lumpur, Malaysia. Retrieved from https://www.fig.net/resources/proceedings/2014/2014_3dcadastre/3Dcad_2014_03.pdf.
13. Kostov, G. (2017). Application of 3D Terrestrial Laser Scanning in the Process of Update or Correction of Errors in the Cadastral Map. *Paper presented at the FIG Working Week 2017. Surveying the world of tomorrow – From digitalisation to augmented reality*. Helsinki, Finland. Retrieved from https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2017/papers/ts01h/TS01H_kostov_8802.pdf.
14. Luo, X. (2016). Investigating Semi-Automated Cadastral Boundary Extraction From Airborne Laser Scanned Data. *Paper presented at the Enschede*. The Netherlands. Retrieved from https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2016/msc/la/luo.pdf.
15. Borkowski, A., Jozkow, G., Ziaja, M., & Becek, K. (2014). Accuracy of 3D Building Models Created Using Terrestrial and Airborne Laser Scanning Data. *Paper presented at the FIG Congress 2014. Engaging the Challenges – Enhancing the Relevance*. Kuala Lumpur, Malaysia. Retrieved from http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts08k/TS08K_borkowski_jozkow_et_al_7003_abs.pdf.
16. Koeva, M., & Elberink, S. O. (2016). Challenges for Updating 3D Cadastral Objects using LiDAR and Image-based Point Clouds. *Paper presented at the 5th International FIG 3D Cadastre Workshop*. Athens, Greece. Retrieved from http://www.gdmc.nl/3dcadastres/literature/3Dcad_2016_19.pdf.

17. Isa, M. N., Teng, C. H., Mohd Jazuli, A. R., Shaharuddin, S., & Mohd Yusof, S. B. (2017). Cadastral In Supporting Smart Cities In Malaysia. *Paper presented at the FIG Working Week 2017. Surveying the world of tomorrow – From digitalisation to augmented reality*. Helsinki, Finland. Retrieved from https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2017/papers/ts06a/TS06A_mohd_noor_chee_hua_et_al_8908.pdf.
18. *Official site of company Autodesk*. (n. d.). Retrived from <https://www.autodesk.com>.
19. *Official site of company Bentley*. (n. d.). Retrived from: <https://www.bentley.com>.
20. *Official site of company Unigine*. (n. d.). Retrived from: <https://www.unigine.com>.

Received 01.10.2018

© S. R. Gorobtsov, A. V. Chernov, 2018

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ



УДК 332

О СТАБИЛЬНОСТИ ГЕОПРОСТРАНСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТАХ ЕГО КОНТРОЛЯ

Евгений Ильич Аврунев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (383)344-31-73, e-mail: avrunev_ei@ngs.ru

На современном этапе ключевым аспектом развития экономики Российской Федерации является ее перевод в электронный вид, что невозможно без создания геопространства в соответствующем территориальном образовании (ТО). Одним из важнейших свойств геопространства является стабильность его метрики, которая определяется координатами пунктов геодезического обоснования (ГО), равномерно расположенными в ТО.

Пункты геодезического обоснования располагаются, как правило, на крышах зданий и сооружений, которые в городских условиях могут подвергаться активному антропогенному и тектоническому воздействию и, как следствие, изменять свое местоположение в пространстве. Поэтому метрика геопространства может деформироваться.

Цель: предложить математический алгоритм, позволяющий на основании выполненных геодезических измерений контролировать стабильность пунктов геодезического обоснования, определяющих метрику геопространства, и, в случае необходимости, уточнять координаты этих пунктов.

Методы: теория математической обработки результатов геодезических измерений.

Результаты: предложена технологическая схема, состоящая из совокупности математических алгоритмов. Реализация этой схемы позволяет контролировать стабильность пунктов геодезического обоснования и, при необходимости, восстанавливать метрику геопространства.

Ключевые слова: геоинформационное пространство, территориальное образование, метрика геопространства, геодезическое обоснование, ГНСС-технологии, наземные измерительные технологии, геодезические пункты, статистические критерии, метод наименьших квадратов (МНК), средняя квадратическая ошибка (СКО), рекуррентное уравнивание.

Введение

Актуальным направлением развития науки на современном этапе развития земельно-имущественных отношений и градостроительной деятельности является создание геоинформационного пространства, позволяющего решать мно-

гочисленные научно-практические задачи устойчивого развития территориального образования [1–10].

Для достижения этой цели геопространство должно обладать следующими свойствами:

- 1) в единой координатной системе с нормативно заданной точностью определять метрические параметры всех объектов территориального образования, влияющих на его устойчивое развитие;
- 2) определять локальные движений блоков земной коры при расположении территориального образования в зоне сейсмической активности;
- 3) обеспечивать геопространственными данными всю территорию ТО;
- 4) сохранять свою стабильность в пространстве и во времени.

Узловыми точками геопространства, которые определяют его метрику и, следовательно, возможность определять линейные и площадные параметры объектов недвижимости, а также их взаимное положение друг относительно друга, являются пункты геодезического обоснования, координаты которых обеспечивают возможность решать все перечисленные выше научно-технические задачи. Следовательно, заданные свойства геопространства обусловлены в первую очередь точностью определения координат пунктов геодезического обоснования и их стабильностью в пространстве и во времени [11].

Геодезическое обоснование (ГО) в настоящее время имеет многоступенчатую структуру и по многим параметрам не соответствует современным требованиям информационного обеспечения градостроительной и кадастровой деятельности. Поэтому на основании работ [6, 12, 13] ГО наиболее целесообразно создавать только в трехступенчатом варианте: опорная межевая сеть (ОМС); межевая сеть сгущения (МСС); межевое съёмочное обоснование (МСО). Такой подход к созданию геодезического обоснования обеспечит заданные свойства метрики геопространства и позволит, в том числе, осуществлять беспрепятственное восстановление границ землепользования и землевладения в случае их утраты или несанкционированного нарушения.

Постановка проблемы

Пункты первой ступени геодезического обоснования, являющиеся носителями координатной системы и, соответственно метрики геопространства, располагаются, как правило, на крышах зданий и инженерных сооружений. В городских условиях эти сооружения в силу антропогенного воздействия могут испытывать существенные осадки и деформации и, как следствие, изменять свое местоположение в пространстве. В результате геодезические пункты, являющиеся узловыми элементами геопространства, изменяют свои пространственные координаты, деформируя соответствующую метрику.

Таким образом, определение стабильности пунктов геодезического обоснования, особенно ее первой ступени, в настоящее время является актуальной научно-технической задачей.

Алгоритм решения проблемы

Определение стабильности геодезических пунктов наиболее целесообразно выполнять на основании контрольных измерений, проводимых с использованием ГНСС-технологий или традиционных наземных методов. Стабильность пунктов в пространстве для варианта измерения контрольной длины линии с использованием электронного тахеометра будет определять выполнение следующего статистического критерия:

$$\Delta = L_{i-j} - S_{i-j} = L_{i-j} - \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \leq t \cdot m_{\text{норм}} = 2 \cdot 2,5 \text{ см} = 5 \text{ см}, \quad (1)$$

где X_i, Y_i, X_j, Y_j – координаты контролируемых пунктов с индексами i, j ;

t – статистический коэффициент, определяющий переход от средних квадратических ошибок к предельным значениям и принимающий при доверительной вероятности $\beta = 0,95$ значение $t = 2$;

L_{i-j} – измеренное значение длины линии электронным тахеометром;

$m_{\text{норм}}$ – нормативная точность построения геодезического обоснования в виде средней квадратической ошибки взаимного положения пунктов в наиболее слабом месте. В соответствии с работами [13, 14] для первой степени целесообразно принять $m_{\text{норм}} = 2,5$ см.

При использовании ГНСС-технологии статистический критерий будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta = \overline{a_{i-j}} - \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \leq t \cdot m_{\text{норм}} = 2 \cdot 2,5 \text{ см} = 5 \text{ см}, \quad (2)$$

где $\overline{a_{i-j}}$ – вектор базовой линии, определенный в результате использования спутникового позиционирования.

Выполнение статистических критериев (1) и (2) обозначает, что расхождения между результатами контрольных измерений с их значениями, вычисленными по координатам пунктов ГО, находятся в пределах точности измерений. Следовательно, с доверительной вероятностью $\beta = 0,95$ возможно принять гипотезу о неизменности в пространстве и времени координат исходных пунктов и метрики принятого для территориального образования геопространства.

Для обоснованного заключения о стабильности метрики геопространства контрольными измерениями должно быть охвачено не менее 30 % пунктов геодезического обоснования. Периодичность выполнения контрольных измерений, особенно в зонах активной сейсмичности, целесообразно установить не менее одного раза в год.

При невыполнении этих критериев возникает необходимость оперативного уточнения координат пунктов ГО, и на их основании – восстановления метрики геопространства.

Принятие гипотезы о нарушении стабильности пунктов в пространстве определяет необходимость выполнения геодезических измерений по всему геодезическому обоснованию. Математическая обработка этих измерений позволит выполнить уточнение координат пунктов ГО и восстановить метрику геопространства территориального образования.

Предположим, что имеется $2t$ -мерный вектор координат пунктов ГО, который ранее был вычислен в результате математической обработки n -мерного вектора измерений L по следующему известному алгоритму метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} [X, Y] &= [X, Y]^{\text{ПРИБ}} + \Delta[X, Y]; \\ \Delta[X, Y] &= \mu(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot \Delta L, \end{aligned} \quad (3)$$

где A – матрица параметрических уравнений поправок;

P – матрица весов результатов измерений;

ΔL – вектор свободных членов, который определяется как разность между результатами геодезических измерений и их значениями, вычисленными по приближенным координатам определяемых пунктов;

μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса, вычисляемая при уравнивании по известной формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum (p \cdot v \cdot v)^2}{r}},$$

где r – число избыточных измерений, определяемых как разность $n - 2t$;

v – поправки из уравнивания результатов геодезических измерений.

Для анализа стабильности в пространстве контролируемых пунктов при наличии всех компонентов уравнения (3) формируется блочный вектор измерений, выполненных как в первоначальную эпоху t_0 построения геодезической сети, так и на момент времени контрольных измерений $t_{\text{КОНТ}}$

$$[\Delta L]^{\text{ПОЛ}} = [\Delta L, \Delta L^{\text{КОНТ}}], \quad (4)$$

где вектор $\Delta L^{\text{КОНТ}}$ определяется как разность между результатом измерения и его значением, вычисленным по уравненным координатам контролируемых пунктов (формула (1) или (2)) в зависимости от вида измерительного средства.

При использовании формулы (4) уточненный вектор координат пунктов вычисляется по следующему алгоритму:

$$\begin{aligned} [X, Y]^{\text{УТОЧ}} &= [X, Y] + \Delta[X, Y]; \\ \Delta[X, Y] &= \mu \cdot \left(\begin{bmatrix} A \\ A^{\text{КОНТ}} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} P \\ P^{\text{КОНТ}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & A^{\text{КОНТ}} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} A \\ A^{\text{КОНТ}} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} P \\ P^{\text{КОНТ}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta L^{\text{КОНТ}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $A^{\text{КОНТ}}$ – матрица параметрических уравнений поправок контрольных геодезических измерений (для ГНСС-технологий она составляется по правилам, изложенным в [12]); $P^{\text{КОНТ}}$ – вектор весов контрольных измерений; μ' – средняя квадратическая ошибка единицы веса, полученная в результате совместной математической обработки как первоначальных, так и контрольных результатов измерений.

При таком способе определения вектора $\Delta L^{\text{КОНТ}}$ уравнение (5) позволяет непосредственно вычислить вектор перемещений контролируемых пунктов первой ступени ГО.

В том случае, когда каждый элемент вектора $\Delta[X, Y]$ соответствует следующему статистическому критерию (6), перемещения пунктов считаются значимыми величинами, превосходящими точность контрольных геодезических измерений. В противоположном случае перемещение считается не установленным, находящемся в пределах точности контрольных геодезических измерений

$$\Delta[X, Y]_i \geq t \cdot \mu' \cdot \sqrt{Q_i} = 2 \cdot \mu' \cdot \sqrt{Q_i}, \quad (6)$$

где Q_i – соответствующий диагональный элемент матрицы весовых коэффициентов, которая является основным компонентом уравнения (5).

Отметим, что при определении стабильности пунктов первой ступени ГО, фиксирующих метрику геопространства, точность контрольных геодезических измерений должна соответствовать следующему условию:

$$m_{\text{ГНСС}} \leq m_{\text{НОРМ}} = 2,5 \text{ см.} \quad (7)$$

Реализация алгоритма (5) со статистическими критериями (6) и (7) позволяет оперативно внести изменения в соответствующие каталоги и базы данных об изменении координат пунктов геодезического обоснования.

Однако в настоящее время, как правило, в уравнении (3) известен только вектор координат и в лучшем случае $2t$ -мерный вектор СКО координат пунктов, являющийся диагональю корреляционной матрицы $K_{[x,y]}$

$$K_{[x,y]} = \mu(A^T \cdot P \cdot A)^{-1}. \quad (8)$$

Следовательно, вопрос совместной математической обработки контрольных измерений в строгом соответствии с методом наименьших квадратов с использованием уравнения (5) решен быть не может.

Выходом из этой ситуации является использование алгоритма рекуррентного уравнивания, предложенного Ю. И. Маркузе [15] и заключающегося в последовательном вычислении матрицы весовых коэффициентов для каждого выполненного i контрольного измерения

$$Q_i = Q_0 - \frac{Q_0 \cdot a_i \cdot a_i^T \cdot Q_0}{\frac{1}{P_i} + a_i \cdot Q_0 \cdot a_i^T}, \quad (9)$$

где Q_0 – начальная матрица с которой необходимо начинать вычисления по предлагаемому алгоритму; P_i – вес соответствующего контрольного измерения.

Для решения поставленной научно-технической задачи матрица Q_0 должна строго соответствовать структуре анализируемого геодезического обоснования, которая вычислялась с использованием уравнения (3) и которая, в настоящее время, как правило, не сохранилась. Следовательно, строгого решения в соответствии с методом наименьших квадратов этой актуальной задачи не существует.

Выходом из создавшейся ситуации является предлагаемое автором приближенное определение Q_0 исходя из следующих технологических аспектов: класса геодезической сети, составляющей первую ступень ГО; сохранившейся схемы расположения пунктов; предполагаемого вектора измерений, который можно сформировать по названию геодезического построения. Например, триангуляция – были измерены все углы и две базисных линии; трилатерация – были измерены только длины линий и для ориентирования сети один или два примычных угла; линейно-угловая сеть – были измерены все углы и длины линий.

Таким образом, предлагаются следующие технологические аспекты для формирования начальной матрицы Q_0 :

1. Диагональными элементами матрицы назначаются весовые коэффициенты, которые обусловлены классом геодезического построения. Например, если исходная сеть была построена в соответствии с требованиями 4-го класса, то нормативная точность измерения элементов соответствовала: СКО определения длины линии в наиболее слабом месте сети $m_S/S = 1/70\ 000$, а точность измерения углов $m_\beta = 2''$. При средней длине линии в исходной сети $S = 2$ км имеем $m_S = 2,8$ см. Принимая в первом приближении, что точность положения пункта по координатным осям x и y одинаковая и равна m_S , получим значения весовых коэффициентов диагональной матрицы Q_0

$$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = m_\beta \sqrt{Q_x + Q_y} = m_\beta \sqrt{2 \cdot Q};$$

$$Q = \frac{m_S^2}{2 \cdot m_\beta^2} = \frac{2,8^2}{2 \cdot 2^2} = 0,98. \quad (10)$$

2. С использованием сохранившейся схемы геодезической сети и предполагаемого n -мерного вектора измерений на основании алгоритма (3) можно получить полную начальную матрицу Q_0

$$Q_0 = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1}, \quad (11)$$

где матрица P формируется на основании нормативных требований к точности измеренных элементов геодезической сети.

Предлагаемые алгоритмы (10) или (11) позволяют сформировать начальную матрицу Q_0 и на ее основании и уравнений (5) и (9) решить поставленную научно-техническую задачу.

Результаты

Совокупность предложенных математических алгоритмов позволяет сформировать технологическую схему определения стабильности пунктов геодезического обоснования; оперативно, в случае необходимости, выполнить уточнение координат пунктов и, как следствие, восстановить метрику геопространства территориального образования (рисунок).



Технологическая схема определения стабильности пунктов геодезического обоснования в территориальном образовании

Заключение

Разработанную технологическую схему предлагается реализовывать во всех территориальных образованиях, подверженных активной техногенной и антропогенной нагрузке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы : указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» : распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Карпик А. П., Осипов А. Г., Мурзинцев П. П. Управление территорий в геоинформационном дискуссе : монография. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 280 с.
4. Карпик А. П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 3–7.
5. Карпик А. П., Хорошилов В. С. Сущность геоинформационного пространства территорий как единой основы развития государственного кадастра недвижимости // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 134–136.
6. Karpik A. P., Avrunev E. I., Truhanov A. E. To the question of geodetic and cartographic provision of cadastral register [Электронный ресурс] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, No. 18. – P. 39601–39602. – Режим доступа : <http://www.republication.com>.
7. Sereдович V. A., Avrunev E. I., Plusnina E. S. Proposals On Mathematical Processing Improvement of Geodetic Measurements For Geodetic Monitoring of Engineering Constructions [Электронный ресурс] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, No. 24. – P. 45553–45557. – Режим доступа : <http://www.republication.com>.
8. China Construction of Geometric Model and Topology for 3d Cadastre – case Study in Taizhou, Jiangsu [Электронный ресурс] / Yuan Ding, Changbin Wu, Nan Jiang, Bingqing Ma, Xinxin Zhou // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016. – Режим доступа : http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_06.pdf (accessed 10 November 2017).
9. Thompson R. J., Van Oosterom P., Soon K. H. Mixed 2D and 3D Survey Plans with Topological Encoding [Электронный ресурс] // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016. – Режим доступа : http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_17.pdf (accessed 10 October 2017).
10. First 3D Cadastral Registration of Multi-level Ownerships Rights in the Netherlands / J. Stoter, H. Ploeger, R. Roes, E. Van der Riet, F. Biljecki, H. Ledoux // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016. – Режим доступа : http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_37.pdf (accessed 10 October 2017).
11. Карпик А. П., Аврунев Е. И., Варламов А. А. Совершенствование методики контроля качества спутникового позиционирования при создании геоинформационного пространства территориального образования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 182–186.
12. Аврунев Е. И. Геодезическое обеспечение государственного кадастра недвижимости : монография. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 143 с.

13. Аврунев Е. И., Метелева М. В. О совершенствовании системы координатного обеспечения государственного кадастра недвижимости // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 1 (25). – С. 60–66.

14. Савиных В. П., Ямбаев Х. К., Генике А. А. Проблемы реконструкции городских геодезических сетей на основе GPS-технологий // Тезисы докладов международной конференции. – Новосибирск, 1995. – С. 5–7.

15. Маркузе Ю. И., Хоанг Нгок Ха. Уравнивание пространственных наземных и спутниковых геодезических сетей. – М. : Недра, 1991. – 275 с.

Получено 12.09.2018

© Е. И. Аврунев, 2018

ABOUT THE STABILITY OF GEOSPACE AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF ITS CONTROL

Evgeny I. Avrunev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (913)901-38-23, e-mail: avrynev_ei@ngs.ru

On the modern stage the key aspect of the economy development in the Russian Federation is its digitizing, which is impossible without creating geospace in corresponding terrestrial entity (TE). One of the most important properties of geospace is the stability of its metrics, which is defined by the coordinates of geodetic control points (GC), equally spaced in TE.

Geodetic control points are positioned, as a rule, on the roofs of buildings and constructions which in urban conditions can be subjected to active anthropogenic and tectonic influence and, hence, change their position in space. That's why geospatial metrics can be deformed.

Objective: to propose mathematical algorithm, which allows on the basis of geodetic measurements to control the stability of geodetic control points, which define the metrics of geospace, and, if necessary, to specify the points coordinates of geodetic measurements.

Methods: the theory of mathematical processing of geodetic measurements.

Results: there was proposed a scheme, consisting of a set of mathematical algorithms. Realization of this scheme allows to control the stability of geodetic control points and, if required, to restore geospatial metrics.

Key words: geoinformational space, terrestrial entity, geospatial metrics, geodetic control, GNSS-technologies, ground-based measurement technologies, ground geodetic stations, statistical criteria, least square methods, root-mean square error, recurrent equalization.

REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation of May 09, 2017 No. 203. On the strategy for the development of the information society in the Russian Federation 2017–2030. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

2. Resolution of the Government of the Russian Federation of July 28, 2017 No. 1632-p. On approval of the program "Digital economy of the Russian Federation". Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

3. Karpik, A. P., Osipov, A. G., & Murzincev, P. P. (2010). *Upravlenie territorij v geoinformacionnom diskuse [Territorial administration in the geoinformation discus]*. Novosibirsk: SSGA Publ, 280 p. [in Russian].

4. Karpik, A. P. (2014). Current state and problems of territories GIS support. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 3–7 [in Russian].
5. Karpik, A. P., & Khoroshilov, V. S. (2012). The essence of territories geoinformation environment as a uniform basis for state property cadastre development. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 134–136 [in Russian].
6. Karpik, A. P., Avrunev, E. I., & Truhanov, A. E. (2015). To the question of geodetic and cartographic provision of cadastral register. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(18), 39601–39602. Retrieved from <http://www.republication.com>.
7. Seredovich, V. A., Avrunev, E. I., & Plyusnina, E. S. (2015). Proposals On Mathematical Processing Improvement of Geodetic Measurements For Geodetic Monitoring of Engineering Constructions. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(24), 45553–45557. Retrieved from <http://www.republication.com>.
8. Yuan Ding, Changbin Wu, Nan Jiang, Bingqing Ma, & Xinxin Zhou. (2016). China Construction of Geometric Model and Topology for 3d Cadastre – case Study in Taizhou, Jiangsu. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch, May 2–6*. New Zealand. Retrieved from http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_06.pdf (accessed 10 November 2017).
9. Thompson, R. J., Van Oosterom, P., & Soon, K. H. (2016). Mixed 2D and 3D Survey Plans with Topological Encoding. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch, May 2–6*. New Zealand. Retrieved from http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_17.pdf (accessed 10 October 2017).
10. Stoter, J., Ploeger, H., Roes, R., Van der Riet, E., Biljecki, F., & Ledoux, H. (2016). First 3D Cadastral Registration of Multi-level Ownerships Rights in the Netherlands. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch, May 2–6*. New Zealand. Retrieved from http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_37.pdf (accessed 10 October 2017).
11. Karpik, A. P., Avrunev, E. I., & Varlamov, A. A. (2014). Improving methods for quality control of satellite positioning when creating geo-space territorial education. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 182–186 [in Russian].
12. Avrunev, E. I. (2010). *Geodezicheskoe obespechenie gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti [Geodetic support of the state real estate cadastre]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 143 p. [in Russian].
13. Avrunev, E. I., & Meteleva, M. V. (2014). Improvement of coordinates support of state property cadastre. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 1(25), 60–66 [in Russian].
14. Savinykh, V. P., Yambaev, Kh. K., & Genike, A. A. (1995). Problems of reconstruction of urban geodetic networks based on GPS-technologies. In *Tezisy докладов mezhdunarodnoj konferencii [Abstracts of Reports of the International Conference]* (pp. 5–7). Novosibirsk [in Russian].
15. Markuze, Yu. I., & Hoang Ngok Ha. (1991). *Uravnivanie prostranstvennyh nazemnyh i sputnikovyh geodezicheskikh setej [Equalization of spatial terrestrial and satellite geodetic networks]*. Moscow: Nedra Publ., 275 p. [in Russian].

Received 12.09.2018

© E. I. Avrunev, 2018

УДК 349.417/.418

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАДАСТРОВОЙ СИСТЕМЫ ГОСУДАРСТВА

Татьяна Николаевна Жигулина

Алтайский государственный аграрный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, Красноармейский пр., 98, кандидат экономических наук, доцент кафедры землеустройства, земельного и городского кадастра, e-mail: TNZhigulina@yandex.ru

Валерий Александрович Мерецкий

Алтайский государственный аграрный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, Красноармейский пр., 98, кандидат биологических наук, доцент кафедры землеустройства, земельного и городского кадастра, e-mail: TNZhigulina@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич Воробьев

Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, магистрант кафедры экономической географии и картографии, тел. (3852)29-12-80, e-mail: vorobiev.921b@mail.ru

Анастасия Олеговна Киселева

Алтайский государственный университет, 656049, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 61, кандидат технических наук, доцент кафедры экономической географии и картографии, тел. (3852)29-12-80, e-mail: stya_007@ngs.ru

В статье приводятся результаты теоретического исследования закономерностей развития кадастровой системы государства. В ряду первоочередных мероприятий создания современной инновационной экономики, нацеленной на эффективную и полную мобилизацию имеющегося потенциала земельных ресурсов и иных объектов недвижимости, находится развитие института кадастра и регистрации прав на недвижимость, что требует проведения исследований теоретического функционирования кадастровой системы государства, хронологии трансформации кадастровых систем вслед за развитием экономической системы общества. В исследовании показано, что трансформация кадастровой системы происходит вслед за развитием экономической системы общества, а в связи с появлением мировых тенденций информатизации общества происходит переход к новой экономической системе. В целях развития теоретических принципов функционирования рассмотрена структура кадастровой системы с позиции структурно-функционального анализа, предложено и обосновано понятие «субфункции подсистемы кадастровой системы». Основываясь на общенаучных системных представлениях, выявлены закономерности развития кадастровой системы во времени, а также соответствующие им этапы развития функций.

Ключевые слова: кадастровая система государства, экономическая система общества, структурно-функциональный анализ, закономерности развития, механизмы развертывания/свертывания функций.

Введение

Формирование современной, адекватной вызовам постиндустриальной эпохи, системы институтов является важнейшей предпосылкой достижения

стратегических целей долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации [1].

В сфере недвижимости важнейшей инфраструктурной основой развития российской экономики выступает институт кадастра недвижимости и регистрации прав, развитие которого находится в ряду первоочередных мероприятий создания современной инновационной экономики, нацеленной на эффективную и полную мобилизацию имеющегося потенциала земельных ресурсов и иных объектов недвижимости [2–4].

В основе функционирования института кадастра лежит определенная кадастровая система – законодательным образом определенная совокупность взаимодействующих кадастровых подсистем, которые в процессе производства основных кадастровых процедур взаимно влияют друг на друга, а результатом взаимного влияния является качественное преобразование каждого конкретного объекта недвижимости в объект кадастра, то есть результатом функционирования любой кадастровой системы является производство кадастровых сведений о конкретном объекте недвижимости в границах определенной территории, позволяющих однозначно идентифицировать этот объект недвижимости в качестве индивидуально-определенной вещи.

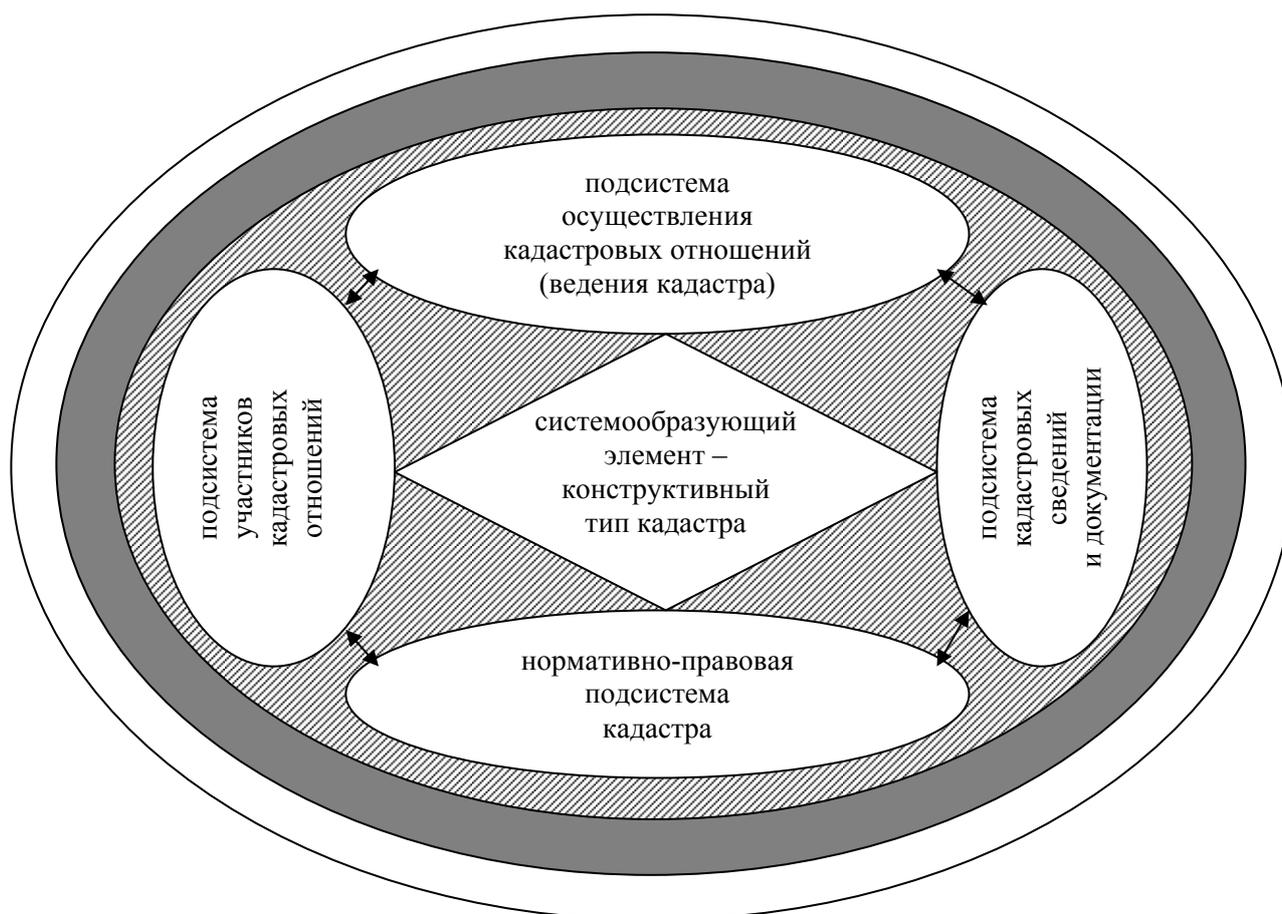
Изучение функционирования кадастровых систем имеет длительную историю и связано с работами таких известных ученых, как А. А. Варламов [5], С. А. Гальченко [6], В. И. Гладкий [7], В. С. Кислов [8], Н. В. Комов [9], П. Ф. Лойко [10], А. С. Чешев [11], И. П. Фесенко, M. Lemmens [12, 13], G. Larsson [14], M. Nicodet [15], I. P. Williamson [16] и др.

Несмотря на столь активное и обстоятельное изучение кадастровых систем ученым сообществом, в целях настоящего исследования важно рассмотреть роль российской кадастровой системы с позиции удовлетворения информационной потребности системы управления земельными ресурсами при переходе к постиндустриальному информационному обществу, а для этого необходимо рассмотреть ряд вопросов теоретического функционирования кадастровой системы государства, хронологию трансформации кадастровых систем вслед за развитием экономической системы общества.

Результаты

Для решения поставленных в данном исследовании задач рассмотрим принципиальную схему кадастровой системы государства (рис. 1).

Под объектом кадастровой системы будем понимать совокупность свойств объектов недвижимости, включенных в кадастр, на основе которых можно определить каждый объект недвижимости в качестве индивидуально-определенной вещи. В кадастре первостепенны пространственные свойства объекта недвижимости (местоположение, границы), его потребительская полезность, выраженная в определенной ценности (стоимости) и правовые свойства (принадлежность к определенной категории земель, титулу права).



Внешняя среда:

-  внешняя среда косвенного воздействия
-  внешняя среда прямого воздействия
-  кадастровая система государства

Рис. 1. Принципиальная схема кадастровой системы государства с позиции системного подхода

Кадастровая система государства существует во взаимосвязи с внешней средой, которую формируют две группы факторов:

– факторы, непосредственно влияющие на функционирование кадастровой системы. К ним следует отнести: законодательство, регулирующее систему кадастра, функционирование и развитие сопряженных государственных систем (налоговой системы, юридической системы и др.), развитие рыночных структур (рынок земли, недвижимости и др.);

– факторы, косвенно влияющие на функционирование кадастровой системы, включают политические, экономические, социально-демографические, правовые, научно-технологические условия, в совокупности формирующие определенную обстановку для формирования, функционирования и развития кадастровой системы государства [17].

При взаимодействии кадастровой системы с внешней средой происходит постоянный обмен информацией между ними. Внешняя среда привносит в кадастровую систему информацию об изменениях в экономической и политической сферах общества и следующих за ними изменениях в рыночных структурах (в первую очередь – рынков земли и недвижимости), изменениях в законодательном регулировании кадастровой системы, а также о тенденциях развития других сопряженных с кадастровой системой государственных систем.

Результатом прохождения внутрисистемных функциональных процессов в кадастровой системе является производство кадастровых сведений [18–20]. В процессе информационного обмена кадастровая система снабжает внешнюю среду (государство) кадастровыми сведениями, используемыми при принятии управленческих решений о правовом, территориальном (пространственном) и экономическом положении объекта кадастровой системы. Классификация кадастровых сведений, использование которых потенциально возможно в целях управления развитием территорий, приведена на рис. 2.

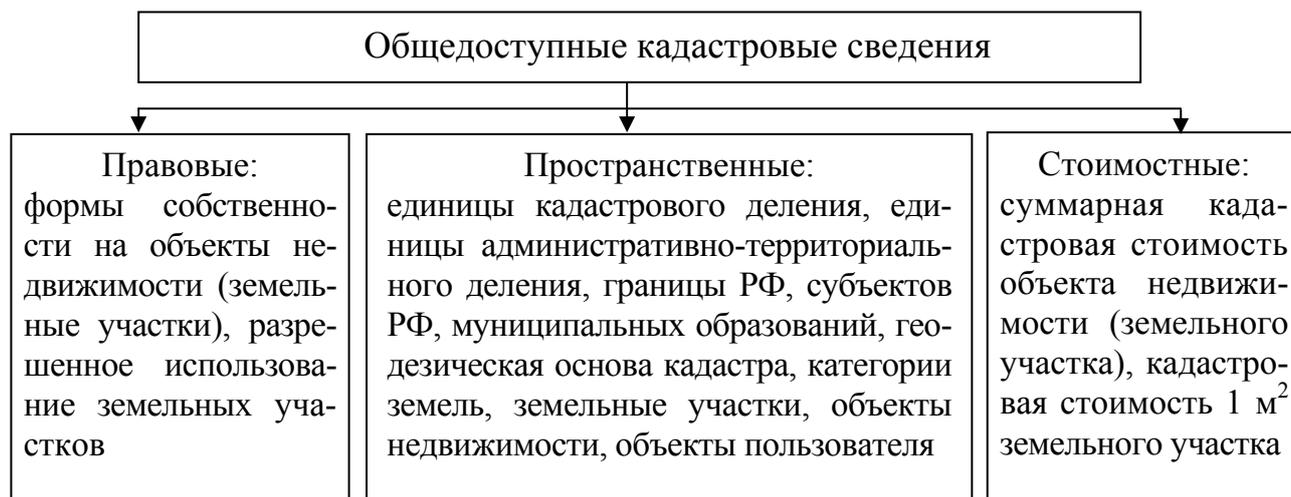


Рис. 2. Классификация кадастровых сведений, использование которых потенциально возможно в целях управления развитием территорий [21]

Структура системы, согласно общепринятым методологическим положениям системного подхода, представляет собой «организацию связей и отношений между подсистемами и элементами, а также состав этих подсистем и элементов, каждому из которых обычно соответствует определенная функция» [22].

Обсуждение

С позиции структурно-функционального анализа, проведенного нами, кадастровой системе свойственны определенные функции. Под функцией кадастровой системы будем понимать совокупную деятельность кадастровой системы, внешне выражающуюся как проявление свойств объектов кадастра.

В целях теоретического развития представлений о функционировании кадастровых систем нами предложено понятие «субфункции подсистемы кадастровой системы», под которой следует понимать деятельность, производимую какой-либо подсистемой, то есть единичный процесс (кадастровую процедуру) по отношению к целому (кадастровой системе). Соотнесение подсистем, субфункций и функций кадастровой системы государства приведено на рис. 3.



Рис. 3. Соотнесение подсистем, субфункций и функций кадастровой системы государства

Согласно приведенному структурно-функциональному анализу кадастровой системы государства и формирующих ее подсистем, можно выделить семь субфункций. Рассмотрим далее содержание и принадлежность каждой из субфункций каждой подсистеме.

1. Регулирующая субфункция выражается в поддержании подсистем кадастровой системы в таком состоянии, которое позволяет достигать целей каждой из подсистем (установление норм и устранение отклонений от заданных параметров функционирования). Регулирующая субфункция свойственна подсистеме-

ме участников кадастровых отношений и проявляется в виде установления норм, правил и регламентов ведения кадастра и осуществления деятельности участников кадастровых отношений.

2. Контролирующая субфункция присуща подсистеме участников кадастровых отношений и реализуется посредством контроля за деятельностью уполномоченных органов по ведению кадастра, а также контроля общего порядка взаимодействия участников кадастровых отношений.

3. Учетная субфункция реализуется непосредственно в подсистеме осуществления кадастровых отношений и заключается во внесении сведений о конкретных объектах недвижимости в стандартизированные учетные формы, результатом является присвоение уникального учетного кадастрового номера каждому конкретному объекту кадастровой системы.

4. Регистрационная субфункция реализуется посредством регистрации правовой принадлежности объекта кадастра конкретному физическому, юридическому лицу или органу муниципальной или государственной власти, что создает юридические основания для возникновения права собственности посредством проведения процедуры государственной регистрации прав. Регистрационная субфункция является одной из базовых подсистемы осуществления кадастровых отношений.

5. Техническая субфункция – это субфункция подсистемы осуществления кадастровых отношений, которая реализуется посредством деятельности специальных уполномоченных лиц (кадастровых инженеров), в результате которой происходит фактическое определение пространственных характеристик объекта недвижимости для последующего внесения этих сведений в кадастр.

6. Информационно-обеспечивающая субфункция направлена на информирование подсистемы участников кадастровых отношений о характеристиках объектов недвижимости, включенных в кадастр. Данная субфункция присуща подсистеме кадастровых сведений и документов.

7. Информационно-регулирующая субфункция выполняется нормативно-правовой подсистемой кадастра и проявляется в виде создания и поддержания в актуальном состоянии нормативно-правовой базы кадастра, устанавливающей законодательные рамки функционирования всех подсистем кадастровой системы.

Согласно принципу эмерджентности, открытому в системном подходе У. Р. Эшби [23], функции кадастровой системы не являются результатом простого сложения субфункций ее подсистем. Аккумулируя в себе субфункции подсистем, кадастровая система, как некоторая целостность, обретает новые функции, присущие только системе и не сводимые без остатка к свойствам отдельных кадастровых подсистем. Такие целостные свойства кадастровой системы принято называть эмерджентными и они могут быть выражены в виде следующих функций кадастровой системы:

1) юридическая функция проявляется в виде защиты прав собственности в отношении всех объектов недвижимости, прошедших процедуру регистрации правового статуса объекта недвижимости в специализированном реестре прав;

2) фискальная (экономическая) функция заключается в определении потребительской полезности объектов недвижимости, включенных в кадастр (кадастровой стоимости), и использовании полученных данных в целях налогообложения недвижимости;

3) стимулирующая функция кадастровой системы проявляется в виде стимулирования протекающих в современной экономике процессов, например, активизации рынков земли и недвижимости;

4) учетно-информационная функция проявляется в получении и аккумуляции внутри кадастровой системы сведений о характеристиках объектов недвижимости в виде постоянно обновляемого и пополняемого банка данных. Сведения, содержащиеся в этом специализированном банке данных, могут быть использованы участниками рынка недвижимости и органами местного самоуправления и государственной власти при принятии управленческих решений.

Функции, выполняемые кадастровой системой, не являются статичными, а изменяются вслед за изменением экономической системы общества, отвечая требованиям того или иного общественно-политического строя [11, 24].

С позиции системных представлений, развитие любой системы происходит по логистической кривой [25]. Применяя знания системного подхода об этом к изучению кадастровой системы, видим, что данные закономерности полноценно прослеживаются во всех кадастровых системах, существовавших некогда на территории Российской империи, РСФСР, Российской Федерации. Результаты выявленных функциональных закономерностей развития кадастровых систем в России приведены на рис. 4.

В целом закономерности развития кадастровых систем соотносятся с общими закономерностями развития систем, подробное исследование которых приведено в работах В. Петрова [25].

Согласно закономерностям развития систем, кадастровая система проходит 4 этапа в своем развитии. Далее охарактеризуем каждый из этих этапов:

0–1 – этап возникновения и становления кадастровой системы – на первоначальном этапе кадастровые системы строятся как полифункциональные (универсальные) системы, которые выполняют множество функций;

1–2 – этап стабилизации функций кадастровой системы – сопровождается процессом развертывания (свертывания) функций под воздействием процессов, происходящих в экономической системе и обществе. На этом этапе могут появляться новые функции и (или) прекращаться существующие (временно или постоянно);

2–3 – этап качественного развития функций кадастровой системы – также сопровождается процессом свертывания (развертывания) функций, однако отличается от предыдущего периода тем, что происходит окончательное качественное насыщение каждой из функций системы, происходит такая их специализация, которая в дальнейшем может послужить основой для формирования новых систем;

3–4 – этап специализации кадастровой системы – является завершающим этапом развития системы и подразумевает специализацию кадастровой системы путем выделения отдельных функций, то есть появление монофункциональности.

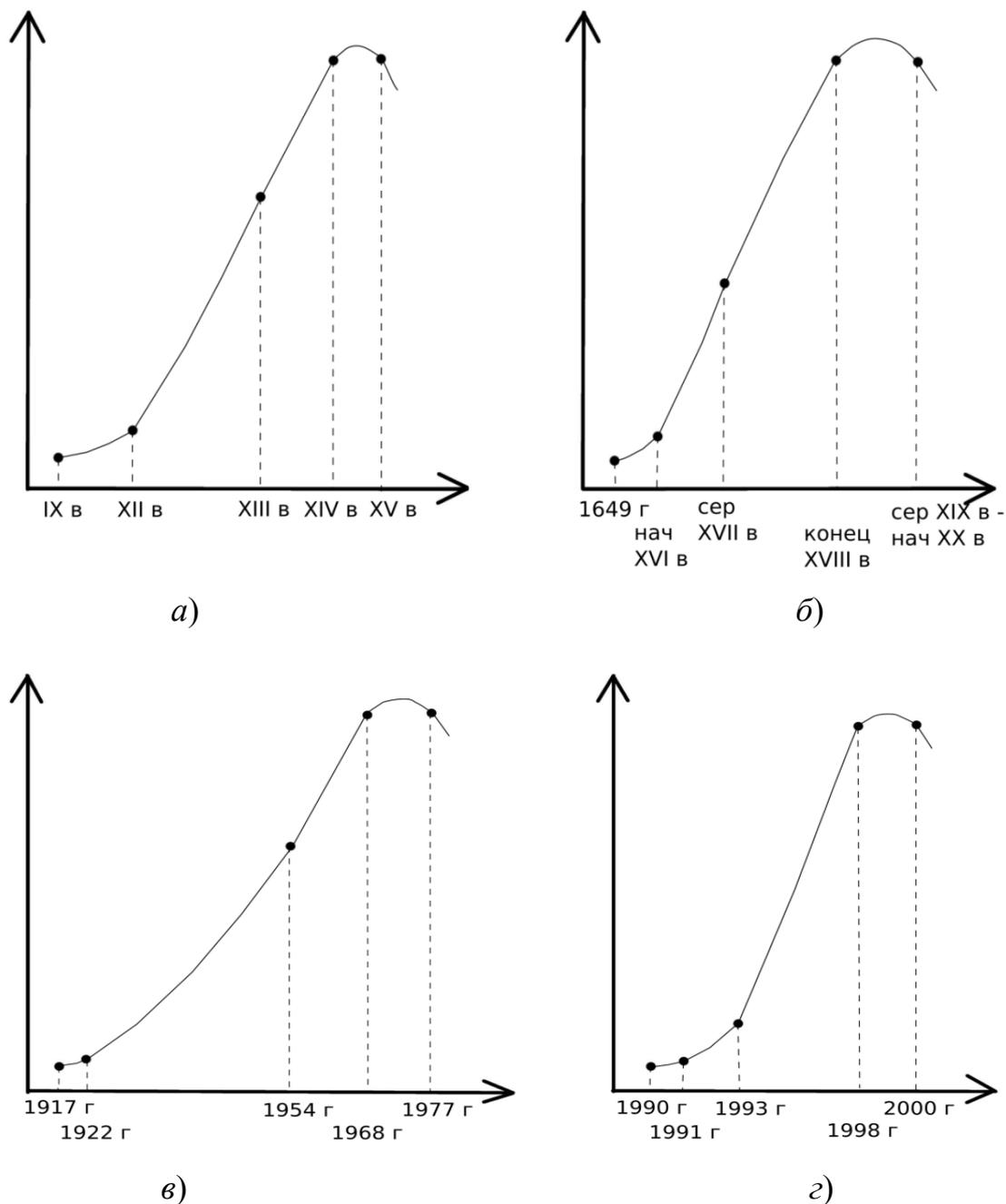


Рис. 4. Функциональные закономерности развития кадастровых систем в России:

а) старорусская кадастровая система; б) российская имперская кадастровая система; в) советская кадастровая система; з) постсоветская кадастровая система

Прохождение стадий развития функций возможно за счет механизмов развертывания (свертывания) функций кадастровой системы. Теоретические аспекты механизмов развертывания (свертывания) в теории систем наиболее полно исследованы в работах В. Петрова [25], где под развертыванием функций понимают «расширение функциональных возможностей системы», а под свертыванием – «устранение лишних и вредных функций системы».

Рассматривая действия механизмов развертывания/свертывания функций, можно проследить совместную эволюцию кадастровой системы государства и развитие функций этой системы, которую обобщенно можно представить в виде следующей цепи событий: 1) формирование кадастровой системы государства как полифункциональной системы (один элемент выполняет множество функций) —> 2) появление новых функций кадастровой системы, качественное развитие существующих (первоначальных) функций в полифункциональной системе —> формирование перехода к монофункциональности кадастровой системы путем свертывания функций —> формирование монофункциональной системы (один элемент выполняет одну функцию).

Заключение

1. Кадастровая система – законодательным образом определенная совокупность взаимодействующих кадастровых подсистем, которые в процессе производства основных кадастровых процедур взаимно влияют друг на друга, а результатом взаимного влияния является качественное преобразование каждого конкретного объекта недвижимости в объект кадастра, то есть результатом функционирования любой кадастровой системы является производство кадастровых сведений о конкретном объекте недвижимости в границах определенной территории, позволяющих однозначно идентифицировать этот объект недвижимости в качестве индивидуально-определенной вещи.

2. С позиции проведенного структурно-функционального анализа, кадастровой системе государства свойственны функции (юридическая, фискальная (экономическая), стимулирующая, учетно-информационная) и субфункции (регулирующая, контролирующая, учетная, регистрационная, техническая, информационно-обеспечивающая, информационно-регулирующая).

3. В своем развитии кадастровая система проходит четыре этапа развития: этап возникновения и становления кадастровой системы, этап стабилизации функций кадастровой системы, этап качественного развития функций кадастровой системы, этап специализации кадастровой системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 № 1662-р [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Жарников В. Б., Ивчатова Н. С. Основные проблемы и положения создания единой учетно-регистрационной системы в Российской Федерации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 170–174.
3. Карпик А. П., Новоселов Ю. А., Рычков А. В. Разработка методики качественной и количественной оценки кадастровой информации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 137–142.
4. Карпик А. П., Ветошкин Д. Н., Архипенко О. П. Совершенствование модели ведения государственного кадастра недвижимости в России // Вестник СГУГиТ. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 53–59.

5. Варламов А. А., Гатауллина Л. А. Проблемы развития кадастровых систем в Российской Федерации // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2013. – № 11 (146). – С. 72–86.
6. Гальченко С. А., Варламов А. А. Вопросы развития систем кадастрового учета и регистрации недвижимости в России // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2017. – № 12. – С. 5–12.
7. Гладкий В. И., Гладкий К. В. О понятийных проблемах недвижимой собственности // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 3, ч. 2. – С. 120–123.
8. Кислов В. С. О реформе кадастровой деятельности // Кадастр недвижимости. – 2015. – № 4 (41). – С. 30–34.
9. Комов Н. В. Роль земельных ресурсов в устойчивом развитии России // Экономика и экология территориальных образований. – 2015. – № 4. – С. 7–14.
10. Лойко П. Ф. О совершенствовании системы управления землепользованием и развитии территориального кадастра в Российской Федерации // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2012. – № 3. – С. 6–18.
11. Комов Н. В., Чешев А. С. Земельно-информационная и кадастровая система – составная часть эффективного управления земельными ресурсами // Экономика и экология территориальных образований. – 2016. – № 1. – С. 7–12.
12. Lemmens M. Towards Cadastre 2034 – International Experts Speak Out: Part I // GIM International. – 2010. – Vol. 24, No. 9 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.gim-international.com/content/article/towards-cadastre-2034>.
13. Lemmens M. Towards Cadastre 2034 – International Experts Speak Out: Part II // GIM International. – 2010. – Vol. 24, No. 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.gim-international.com/content/article/towards-cadastre-2034-part-ii>
14. Larsson G. Land registration and cadastral systems. – USA, NY : Halsted Press New York, 1991. – 175 p.
15. Nicodet M. Kataster der öffentlich-rechtlichen Eigentumsbeschränkungen // Geomatik Schweiz. – 2013. – Vol. 6. – P. 301–302.
16. Land Administration for Sustainable Development / I. P. Williamson, S. Enemark, J. Wallace, A. Rajabifard. – ESRI Press, 2010. – 487 p.
17. Жигулина Т. Н. Трансформация функций кадастровой системы государства в историческом развитии // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 11 (157). – С. 71–78.
18. Карпик А. П., Колмогоров В. Г., Рычков А. В. Разработка критериев оценки качества кадастровых данных // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 133–136.
19. Хлебникова Е. П., Мирошникова О. А. Анализ информационного наполнения публичной кадастровой карты по регионам Российской Федерации // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 127–142.
20. Вылегжанина В. В. О некоторых результатах верификации данных, полученных в процессе интеграции государственного кадастра недвижимости и Единого государственного реестра прав на недвижимое имущество и сделок с ним, и их использовании для целей налогообложения // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3(35). – С. 190–200.
21. Жигулина Т. Н., Кострицина М. Н., Мерецкий В. А. Перспективные подходы к обоснованию эффективности землепользования на основе использования кадастровой информации // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 6 (152). – С. 81–87.
22. Большой экономический словарь / под ред. А. Н. Азрилияна. – 5-е изд. доп. и перераб. – М. : Институт новой экономики, 2002. – 469 с.

23. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1959. – 433 с.

24. Жигулина Т. Н., Мерецкий В. А. Обзор мировых тенденций изменения кадастровых систем // XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству» : сб. статей: в 2 кн. – Барнаул : РИО АГАУ, 2018. – Кн. 2. – С. 74–75.

25. Петров В. Закономерности развития функций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.trizland.ru/trizba/pdf-books/zrts-05-function.pdf> (дата обращения 20.04.2018).

Получено 26.09.2018

© Т. Н. Жигулина, В. А. Мерецкий, Д. А. Воробьев, А. О. Киселева, 2018

PATTERNS OF THE STATE CADASTRAL SYSTEM DEVELOPMENT

Tatiana N. Zhigulina

Altai State Agrarian University, 98, Krasnoarmeysky Prospect St., Barnaul, 656049, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Land Management, Land and Urban Cadastre, e-mail: TNZhigulina@yandex.ru

Valery A. Meretsky

Altai State Agrarian University, 98, Krasnoarmeysky Prospect St., Barnaul, 656049, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Land Management, Land and Urban Cadastre, e-mail: TNZhigulina@yandex.ru

Dmitry A. Vorobyov

Altai State University, 61, Prospect Lenina St., Barnaul, 656049, Russia, Master Student, Department of Economic Geography and Cartography, phone: (3852)29-12-75, e-mail: vorobiev.921b@mail.ru

Anastasia O. Kiseleva

Altai State University, 61, Prospect Lenina St., Barnaul, 656049, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Economic Geography and Cartography, phone: (3852)29-12-75, e-mail: stya_007@ngs.ru

The article presents the results of a theoretical study of the laws of the state cadastral system development. The development of the Institute of cadastre and registration of real estate rights leads to the creation of a modern innovation economy. The essence of the innovative economy in relation to real estate is to fully mobilize the existing potential of land resources and other real estate. This requires theoretical studies of the functioning of the state cadastral system, the chronology of the cadastral systems transformation. The study shows that the cadastral system transformation follows the economic system development of society. The advent of world trends of the Informatization of the society, characterizes the transition to a new economic system. The study considers the structure of the cadastral system in terms of structural and functional analysis. The concept of "subfunction of the cadastral system subsystem" is proposed and substantiated. Based on General scientific system representations, regularities of development of cadastral system in time, and also the stages of development of functions corresponding to them are revealed.

Key words: cadastral system of the state, the economic system of society, structural and functional analysis, patterns of development, mechanisms of deployment / folding functions.

REFERENCES

1. Order of the Government of the Russian Federation No. 1662-r of November 17, 2008. The Concept of Long-Term Social and Economic Development of the Russian Federation until 2020. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
2. Zharnikov, V. B., & Ivchatova, N. S. (2014). The main problems and the status of buildings in a unified recording and registration system in the Russian Federation. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, S/4, 170–174 [in Russian].
3. Karpik, A. P., Novoselov, Yu. A., & Rychkov, A. V. (2013). Development of methods of qualitative and quantitative assessment of cadastral information. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, S/4, 137–142 [in Russian].
4. Karpik, A. P., Vetoshkin, D. N., & Arkhipenko, O. P. (2013). Improvement of the model of conducting the state cadastre of real estate in Russia. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 3(23), 53–59 [in Russian].
5. Varlamov, A. A., & Gataullina, L.A. (2013). Problems of development of cadastral systems in the Russian Federation. *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii [Property Relations in the Russian Federation]*, 11(146), 72–86 [in Russian].
6. Gal'chenko, S. A., & Varlamov, A. A. (2017). Questions of development of systems of cadastral accounting and registration of real estate in Russia. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel' [Land Management, Cadastre and Land Monitoring]*, 12, 5–12 [in Russian].
7. Gladkiy, V. I., & Gladkiy, K. V. (2011). On the conceptual problems of the immovable property. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2015: T. 3, ch. 2. [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 3, Part 2]* (pp. 120–123). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. Kislov, V. S. (2015). On the reform of cadastral activities. *Kadastr nedvizhimosti [Estate Cadastre]*, 4(41), 30–34 [in Russian].
9. Komov, N. V. (2015). The role of land resources in the sustainable development of Russia. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy [Economy and Ecology of Territorial Entities]*, 4, 7–14 [in Russian].
10. Loyko, P. F. (2012). About improvement of management system of land use and development of the territorial inventory in the Russian Federation. *Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiyskoy Federatsii [Property Relations in the Russian Federation]*, 3, 6–18 [in Russian].
11. Komov, N. V., & Cheshev, A. S. (2016). Land information and cadastral system-an integral part of effective land management. *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy. [Economy and Ecology of Territorial Entities]*, 1, 7–12 [in Russian].
12. Lemmens, M. (2010). Towards Cadastre 2034 – International Experts Speak Out: Part I. *GIM International*, 24(9) [PDF for Digital Edition]. Retrieved from <https://www.gim-international.com/content/article/towards-cadastre-2034>.
13. Lemmens, M. (2010). Towards Cadastre 2034 – International Experts Speak Out: Part II. *GIM International*, 24(10) [PDF for Digital Edition]. Retrieved from <https://www.gim-international.com/content/article/towards-cadastre-2034-part-ii>.
14. Larsson, G. (1991). *Land registration and cadastral systems*. NY, USA: Halsted Press New York, 175 p.
15. Nicodet, M. (2013). Kataster der öffentlich-rechtlichen Eigentumsbeschränkungen. *Geomatik Schweiz*, 6, 301–302.
16. Williamson, I. P., Enemark, S., Wallace, J., & Rajabifard, A. (2010). *Land Administration for Sustainable Development*. ESRI Press, 487 p.
17. Zhigulina, T. N. (2017). Transformation of the functions of the cadastral system of the state in the historical development. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]*, 11(157), 71–78 [in Russian].

18. Karpik, A. P., Kolmogorov, V. G., & Rychkov, A. V. (2013). Development of criteria for evaluating the quality of inventory data. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 4/S, 133–136 [in Russian].
19. Khlebnikova, E. P., & Miroshnikova, O. A. (2016). Analysis of the content of the public cadastral map in the Russian regions. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 127–142 [in Russian].
20. Vylegzhanina, V. V. (2016). About some results of verification of the data received in the course of integration of the state cadastre of real estate and the unified state register of the rights to real estate and transactions with it, and their use for the purposes of the taxation. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 190–200 [in Russian].
21. Zhigulina, T. N., Kostitsina, M. N., & Meretskiy, V. A. (2017). Promising approaches to the justification of the efficiency of land use through the use of cadastral information. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]*, 6(152), 81–87 [in Russian].
22. Azriliyan, A. (Ed.). (2002). *Bol'shoj ehkonomicheskij slovar' [The big economic dictionary]* (5th ed.). Institute of New Economy, 469 p [in Russian].
23. Eshbi, U. R. (1959). *Introduction to Cybernetics*. Foreign Literature Publ., 433 p.
24. Petrov, V. (n. d.). Laws of development of functions. Retrieved from <https://www.trizland.ru/trizba/pdf-books/zrts-05-function.pdf> [in Russian].
25. Zhigulina T. N., & Meretskiy, V. A. (2018). Overview of the global trends of cadastral systems. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Kn. 2. Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaystvu [Proceedings of International Scientific-Practical Conference: Book 2. Agricultural Science – to Agriculture]* (pp. 74–75). Barnaul: RIO AGAU [in Russian].

Received 26.09.2018

© T. N. Zhigulina, V. A. Meretskiy, D. A. Vorobyov, A. O. Kiseleva, 2018

УДК 349.417/.418

ПРИОСТАНОВЛЕНИЯ И ОТКАЗЫ В ПРОВЕДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО КАДАСТРОВОГО УЧЕТА НЕДВИЖИМОГО ИМУЩЕСТВА

Виктор Николаевич Ключниченко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (913)450-94-57, e-mail: kimirs@yandex.ru

В работе выполнен анализ причин приостановлений, регламентируемых действующим законодательством, сдерживающих проведение государственного кадастрового учета. Показано, что имеет место существенное различие между временем, затрачиваемым на проведение государственного кадастрового учета, и длительностью приостановлений. Многочисленность причин приостановлений возможно свести к минимуму путем издания двух инструкций по разъяснению узких мест кадастровой деятельности, включая процедуру согласования границ, подготовку необходимых документов и обеспечению однозначной интерпретации требований органа регистрации прав.

Целью данной работы является анализ причин приостановлений осуществления государственного кадастрового учета и разработка предложений по снижению их влияния. Актуальность темы заключается в том, что в ней даны предложения по сокращению сроков формирования налогооблагаемой базы при ведении отечественного кадастра.

Ключевые слова: государственный кадастровый учет, инструкция, кадастровая деятельность, налогооблагаемая база, орган регистрации прав, приостановления, отказы.

Введение

Одной из основных целей создания и ведения кадастра во все времена является фискальная функция. Для того, чтобы взимать налоги с владельцев недвижимого имущества, необходимо зарегистрировать их права на конкретные объекты [1]. С этой целью осуществляются государственный кадастровый учет (ГКУ) и государственная регистрация прав [2]. Данные процедуры предусмотрены Федеральным законом от 13.07.2015 № 218 [3], согласно которому на ГКУ отводится пять рабочих дней, а длительность приостановлений составляет несколько месяцев, при этом не исключены отказы в проведении кадастрового учета. Данным законом предусмотрено 57 причин для приостановлений в проведении государственного кадастрового учета недвижимого имущества и вероятность того, что ни одна из них не окажется препятствием при выполнении конкретного заявления, крайне мала. Подтверждением тому являются статистические данные, приводимые как на сайте Росреестра, так и в имеющихся публикациях [4, 5]. Происходит задержка процедуры формирования налогооблагаемой базы, а в некоторых случаях наступает отказ в проведении кадастрового учета. Целью данной работы является анализ причин приостановлений проведения кадастрового учета и разработка предложений по снижению их влияния на формировании учета недвижимого имущества.

Федеральный закон от 13.07.2015 № 218 «О государственной регистрации недвижимости» в редакции от 01.07.2018 претерпел несколько изменений после его официального вступления в силу. Данные изменения касаются главным образом количественного и качественного состава причин приостановлений и отказов в проведении государственного кадастрового учета. Согласно ст. 1 данного закона Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН) является сводом достоверных систематизированных сведений об учтенном недвижимом имуществе, о зарегистрированных правах на недвижимое имущество, основаниях их возникновения и правообладателях. Государственная регистрация прав на недвижимое имущество представляет собой юридический акт признания и подтверждения факта возникновения, изменения, перехода, прекращения права определенного лица на недвижимое имущество. Государственная регистрация права является единственным доказательством существования зарегистрированного права, которое может быть оспорено только в судебном порядке. Перечень объектов недвижимости и порядок их формирования предусмотрен действующим законодательством [6–15].

Объектами государственного кадастрового учета являются земельные участки, а также расположенные на них здания, сооружения, помещения, включая машино-места, объекты незавершенного строительства, единые недвижимые комплексы. Вместе с тем положения вышеуказанного закона не применяются к воздушным судам и судам внутреннего плавания, несмотря на то, что такие объекты имеются у отдельной части граждан на законных основаниях.

Обратиться в органы регистрации прав (ОРП) с заявлением о проведении государственного кадастрового учета или регистрации прав могут собственники недвижимого имущества, иностранные граждане и лица без гражданства, международные организации, муниципальные образования, органы государственной власти и местного самоуправления, кадастровые инженеры, нотариусы и судебные приставы-исполнители.

Проблемы и возможные пути их решения

К сожалению, формирование недвижимого имущества носит заявительный характер. Это означает, что инициатива всегда исходит от правообладателя объекта или его доверенных лиц. Следовательно, полного описания недвижимого имущества в Едином государственном реестре недвижимости при реализации заявительного характера ведения отечественного кадастра достичь невозможно [16–18]. Существенным препятствием для формирования сведений о недвижимом имуществе является также множественность основных и дополнительных характеристик объектов, вносимых в кадастр. Данный перечень может быть расширен, то есть он не является закрытым.

Многочисленность характеристик, вносимых в ходе кадастрового учета в ЕГРН, повышает вероятность увеличения срока оформления недвижимости. Для того, чтобы поставить на учет недвижимое имущество и взять с него

налоги, достаточно нескольких характеристик, например: вид объекта, владелец объекта, назначение объекта, вид права на объект, адрес (местоположение) объекта, площадь объекта, кадастровый номер. Этих характеристик достаточно для индивидуализации объекта и его владельца. Вместе с тем, если возникает процедура купли-продажи недвижимого имущества, то в ЕГРН будут внесены основные и дополнительные сведения в полном объеме.

В процессе формирования недвижимого имущества создается парадоксальная ситуация: государство и муниципалитеты должны получать доходы в виде налога и арендной платы с недвижимого имущества, а государственные органы в лице органа регистрации прав сдерживают решение этой задачи, заботясь о полноте и качестве вносимой в кадастр информации. Однако, если не оформлены права, то налогоплательщик отсутствует.

Причины приостановлений проведения государственного кадастрового учета носят разносторонний характер, однако их можно условно разделить на две группы: ошибки, которые допускают кадастровые инженеры в процессе межевания, и ошибки, объясняемые недостаточной согласованностью между требованиями к подготавливаемым материалам кадастровыми инженерами и требованиями органа регистрации прав.

За время действия указанного выше федерального закона причины приостановлений и отказов в проведении ГКУ изменились. Например, некоторые причины отказов в проведении ГКУ получили статус приостановочных [3]: п. 7, 20, 26, 27, 28, 29, 51, вместе с тем количество приостановлений непрерывно увеличивалось. При этом продолжительность приостановлений, согласно ст. 26 данного закона, может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев, а если возникает судебное разбирательство, то ГКУ объекта может не состояться. Тем не менее, согласно действующему законодательству, время проведения ГКУ сокращено до пяти рабочих дней. Приведенные выше сроки несопоставимы, поскольку разница между ними огромная. Поэтому целесообразно пересмотреть сроки приостановления кадастрового учета.

Одной из основных причин приостановления ГКУ является наложение (пересечение) границ смежных земельных участков, а также земельных участков с границами населенных пунктов, муниципальных образований или территориальных зон. Согласно исследованию В. В. Алакоза [19], более 50 % поставленных на государственный учет земельных участков имеют проблемные границы [19–22]. Это объясняется тем, что при становлении отечественного кадастра границы многих земельных участков формировались без межевания на основании топографических планов крупного масштаба. Материалы таких определений были внесены в кадастр и считаются достоверными до внесения изменений. Поэтому при обнаружении пересечений (наложений) границ ГКУ приостанавливается и владельцу ранее учтенного земельного участка (РУЗУ) предлагается за свой счет выполнить кадастровые работы, чтобы доказать достоверность границ своего земельного участка. Данная ситуация обременительна для большинства владельцев недвижимого имущества, поскольку приходится пла-

тить дважды. При этом вина владельцев недвижимого имущества полностью отсутствует. В некоторых зарубежных странах подобные коллизии решаются за счет кадастровых инженеров, допустивших ошибку, или за счет их родственников в течение тридцати лет после оформления недвижимости [23–25]. Такие меры в наших условиях неприемлемы, поскольку пересечение (наложение) границ смежных земельных участков не носит единичного характера, а обусловлено декларативным способом определения границ, являющимся основным в 1990-е гг. Поэтому в настоящее время приступили к выполнению комплексных кадастровых работ за счет бюджетных средств, что позволит ликвидировать имеющие место наложения и пересечения границ недвижимого имущества.

Согласно статистическим данным, представленным Росреестром и региональными Управлениями Росреестра, средний процент приостановлений составляет около 11 %. Ежегодно в Росреестр подается около 1 млн заявлений, из которых более десяти тысяч отклоняется. Таким образом, если принять за минимум налог на дачные участки граждан равным 4 тыс. руб./год, то в бюджет муниципалитета не поступит более 40 млн руб.

В ст. 26 ФЗ № 218 перечислены основания возврата заявления и документов, подаваемых заявителями для осуществления ГКУ и госрегистрации прав. К основным из этих оснований относятся:

- несоответствие представленных документов установленному формату;
- документы имеют подчистки и приписки;
- не уплачена государственная пошлина за проведение госрегистрации прав в течение пяти дней после подачи заявления;
- заявление не подписано заявителем.

Если внимательно изучить все причины приостановлений, то можно сделать следующие выводы. Целесообразно представить статистику всех причин приостановлений и на основании их анализа издать инструкцию по формированию недвижимого имущества для кадастровых инженеров. Вместе с тем назначение инструкции заключается в упреждении подобных ситуаций. Таким образом, некоторые пункты, указывающие на приостановление кадастрового учета, представится возможным изъять из Федерального закона № 218, например: порядок согласования границ (п. 25), требования доступа к образуемому земельному участку (п. 26), требования к предельному размеру образуемого земельного участка (п. 28), порядок образования земельного участка в счет доли в праве общей собственности (п. 30).

Что касается инструкции для органа регистрации прав, то такую инструкцию должен разработать Росреестр совместно с Министерством экономического развития. После ее проработки саморегулируемыми организациями кадастровых инженеров и согласования проблемных вопросов такая инструкция должна быть издана. Таким образом, количество приостановлений государственного кадастрового учета сократится, что, в свою очередь, повысит вероятность беспрепятственного прохождения процедуры формирования недвижимого имущества.

Выводы и рекомендации

Подводя черту под сказанным выше, можно сделать следующие выводы.

1. Множество причин приостановлений в проведении государственного кадастрового учета сдерживает процессы формирования недвижимого имущества, поэтому их количество необходимо сократить путем выдачи заявителям памятки с указанием требований к подготавливаемым ими документам.

2. Во время заключения договора с заказчиком необходимо убедиться, что заявленное имущество является объектом недвижимости, сведения о котором вносятся в ЕГРН.

3. Количество причин приостановлений может быть снижено за счет издания инструкции для кадастровых инженеров и инструкции для органа регистрации прав. После согласования данных инструкций между заинтересованными сторонами представится возможность существенным образом сократить время формирования недвижимого имущества.

4. Некоторые причины приостановлений не имеют принципиального значения и могут быть устранены посредством выставления соответствующих буклетов в вестибюле приемной Росреестра и электронного справочника. Сюда можно отнести пункты, отражающие подачу заявителем неполного перечня необходимых документов (п. 5), предъявленные документы не соответствуют требованиям по форме и содержанию (п. 7), документы подписаны неправомочными лицами (п. 8).

5. Процедуру согласования границ с ранее учтенными земельными участками, поставленными на кадастровый учет без межевания, необходимо урегулировать.

6. Опыт ведения кадастра зарубежных стран, в которых владелец недвижимого имущества является основным участником земельно-имущественных отношений, необходимо учесть. При этом целесообразно вернуть в полном объеме процедуру правовой экспертизы предъявляемых заявителями документов, что снизит процент судебных разбирательств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К. М., Ключниченко В. Н. Некоторые вопросы ведения кадастра в России // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 103–107.
2. Ключниченко В. Н. Особенности ведения кадастра на современном этапе : монография. – Новосибирск : СГГА. 2011. – 138 с.
3. О государственной регистрации недвижимости [Электронный ресурс] : федер. закон от 13.07.2015 № 218-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Ключниченко В. Н., Костенко М. Д. Анализ причин приостановлений и отказов в осуществлении государственного кадастрового учета // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 102–108.
5. Аврунев Е. И., Каленицкий А. И., Ключниченко В. Н. Проблемы кадастровой деятельности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 99–102
6. Градостроительный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 13.07.2015). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

7. Жилищный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 29.12.2004 № 188-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 11.01.2018). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

8. Земельный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 13.07.2015). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. Налоговый кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 31.07.1998 № 146-ФЗ (ред. от 13.07.2015). Ч. 1. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

10. О внесении изменений в Федеральный закон «О государственном кадастре недвижимости» и статью 76 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» в части совершенствования деятельности кадастровых инженеров [Электронный ресурс] : федер. закон от 30.12.2015 № 452-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

11. О внесении изменений в Земельный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изм. и доп., вступ. в силу с 15.07.2016) [Электронный ресурс] : федер. закон от 23.06.2014 № 171-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

12. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части государственной регистрации прав и государственного кадастрового учета объектов недвижимости [Электронный ресурс] : федер. закон от 23.07.2013 № 250-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

13. Повышение качества государственных услуг в сфере государственного кадастрового учета недвижимого имущества и государственной регистрации прав на недвижимое имущество и сделок с ним [Электронный ресурс] : распоряжение Правительства Российской Федерации от 01.12.2012 № 2236-р. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

14. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 13.07.2015 № 228-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

15. О кадастровой деятельности [Электронный ресурс] : федер. закон от 13.07.2015 № 221-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2017). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

16. Карпик А. П., Ветошкин А. П., Архипенко О. П. Совершенствование модели ведения государственного кадастра недвижимости в России // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 53–60.

17. Карпик А. П., Ветошкин Д. Н., Архипенко О. П. Анализ современного состояния государственного кадастра недвижимости в России // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.) : сб. молодых ученых СГГА. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 3–11.

18. Ветошкин Д. Н. Повышение качества и доступности государственных услуг в сфере кадастра недвижимости путем введения организации государственно-частного партнерства // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3(16). – С. 66–74.

19. Алакоз В. В. Доклад о проблемах кадастра недвижимости и их преодолению [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rachz.ru/gkn_probl.html.

20. Ключниченко В. Н., Тимофеева Н. В. Особенности ведения кадастра на современном этапе // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 3, ч. 2. – С. 52–55.

21. Жарников В. Б., Ключниченко В. Н., Конева А. В. К вопросу об ошибках в сведениях Российского кадастра // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» :

сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 127–133.

22. Ключниченко В. Н., Киселева А. О. Система характеристик объектов государственного кадастра недвижимости // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 79–84.

23. Никонов П. Н., Журавский Н. Н. Недвижимость, кадастр и мировые системы регистрации прав на недвижимое имущество : Аналит. обзор. 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.allpravo.ru/library/doc99p0/instrum5237/item5238.html>.

24. Ларссон Герхард. Регистрация прав на землю и кадастровые системы. – Великий Новгород : Земля, 2002. – 53 с.

25. Zevenbergen J. Systems of Land Registration. Aspects and Effects [Electronic resource]. – Nederland's Commissievoor Geodesie Netherlands Geodetic Commission, Delft, 2002. – Режим доступа : <http://ncg.knaw.nl/Publicaties/Geodesy/pdf/51Zevenbergen.pdf>.

Получено 26.09.2018

© В. Н. Ключниченко, 2018

SUSPENSION AND REFUSALS IN CONDUCT OF STATE CADASTRE OF REAL ESTATE

Victor N. Klyushnichenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (913)450-94-57, e-mail: kimirs@yandex.ru

This paper considers the analysis of the reasons for suspensions, regulated by the current legislation, restraining the state cadastral registration. It is shown that there is a significant difference between the time spent for conducting state cadastral registration and the duration of suspension. Numerous reasons for the suspension can be reduced to the minimum by issuing two instructions. One of them should be aimed at clarifying bottlenecks in cadastral activities, including the procedure for harmonizing borders and preparing necessary documents, while the other will provide an unambiguous interpretation of the requirements of the registration authority.

The purpose of this paper is to analyze the reasons for the state cadastral registration suspension and develop proposals to reduce their impact. The relevance of the topic lies in the fact that it contains proposals on reducing the timeframe for the formation of a taxable base in the conduct of the domestic cadastre.

Key words: state cadastral registration, instruction, cadastral activity, taxable base, suspension, refusal.

REFERENCES

1. Antonovich, K. M., & Klyushnichenko, V. N. (2015). Some questions of maintaining the inventory in Russia. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5/S, 103–107 [in Russian].

2. Klyushnichenko, V. N. (2011). *Osobennosti vedeniya kadastra na sovremennom ehtape [Features of maintaining the inventory at the present stage]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 138 p. [in Russian].
3. Federal law of July 13, 2015 No. 218–FZ. About the state registration of the real estate. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
4. Klyushnichenko, V. N., & Kostenko, M. (2014). The analysis of the reasons of stay and refusals in implementation of the state cadastral registration. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 3(27), 102–107 [in Russian].
5. Avrunev, E. I., Kalenitsky, A. I., & Klyushnichenko, V. N. (2015). Problems of cadastral activity. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aehrofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5/S, 99–102 [in Russian].
6. Federal law of December 29, 2004 No. 190–FZ (edition of July 13, 2015). Town-planning code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
7. Federal law of December 29, 2004 No. 188–FZ (with amendment and additional from January 11, 2018). The housing code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
8. Federal law of October 25, 2001 No. 136–FZ (edition of July 13, 2015). Land code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
9. Federal law of July 31, 1998 No. 146–FZ (edition from of July 13, 2015), Part.1. Tax Code of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
10. Federal law of December 30, 2015 No. 452–FZ. About introduction of amendments to the federal law "About the State Immovable Property Cadastre" and article 76 of the federal law "About Education in the Russian Federation" regarding improvement of activity of cadastral engineers. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
11. Federal law of June 23, 2014 No. 171–FZ (with amendment and additional from July 15, 2016). About introduction of amendments to the Land code of the Russian Federation and separate acts of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
12. Federal law of June 23, 2013 No. 250–FZ. About introduction of amendments to separate acts of the Russian Federation regarding the state registration of the rights and the state cadastral registration of real estate objects. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
13. Order of the Government of the Russian Federation of December 01, 2012 No. 2236-r. Improvement of quality of public services in the sphere of the state cadastral registration of real estate and the state registration of the rights for real estate and transactions with him. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
14. Federal law of July 13, 2015 No. 228–FZ. About introduction of amendments to separate acts of the Russian Federation. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
15. Federal law of July 13, 2015 No. 221–FZ (with amendment and additional from January 01, 2017). About cadastral activity. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
16. Karpik, A. P., Vetoshkin, A. P., & Archipenko, O. P. (2013). Improvement of model of maintaining the State Immovable Property Cadastre in Russia. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 3(23), 53–60 [in Russian].
17. Karpik, A. P., Vetoshkin, D. N., & Archipenko, O. P. (2012). The analysis of the current state of the State Immovable Property Cadastre in Russia. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: sbornik molodyh uchenyh SGGGA [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Collection of Young Scientists SSGA]* (pp. 3–11). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
18. Vetoshkin, D. N. (2011). Improvement of quality and availability of public services in the sphere of the inventory of the real estate by introduction of the organization of public-private partnership. *Vestnik SGGGA [Vestnik SSGA]*, 3(16), 66–74.
19. Alakoz, V. V. (n. d.). Report on problems of the inventory of the real estate and their overcoming. Retrieved from http://www.rachz.ru/gkn_probl.html.

20. Klyushnichenko, V. N., & Timofeeva, N. V. (2010). Features of maintaining the inventory at the present stage. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2010: T. 3, ch. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2010: Vol. 3, Part 2]* (pp. 52–55). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
21. Zharnikov, V. B., Klyushnichenko, V. N., & Koneva, A. V. (2017). To a question of mistakes in data of the Russian inventory. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: International Scientific Conference: Vol. 2. Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 127–133). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian]
22. Klyushnichenko, V. N., & Kiselyova, A. O. (2014). System of characteristics of subjects of the State Immovable Property Cadastre. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Ekonomicheskoe razvitie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Ekonomika prirodopol'zovaniia, zemleustroistvo, lesoustroistvo, upravlenii e nedvizhimost'iu [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Economic Development of Siberia and the Far East. Environmental Economics, Land Management, Forestry Management and Property Management]* (pp. 79–84). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
23. Nikonov, P. N., & Zhuravsky, N. N. (2006). Real estate, inventory and world systems of registration of the rights for real estate. Retrieved from <http://www.allpravo.ru/library/doc99p0/instrum5237/item5238.html> [in Russian].
24. Larsson, Gerhard. (2002). *Registraciya prav na zemlyu i kadaastrovye sistemy [Registration of land rights and cadastral systems]*. Veliky Novgorod: Zemlya Publ., 53 p. [in Russian].
25. Zevenbergen, J. (2002). *Systems of Land Registration. Aspects and Effects*. Delft: Netherland's Commissievoor Geodesie Netherlands Geodetic Commission. Retrieved from <http://ncg.knaw.nl/Publicaties/Geodesy/pdf/51Zevenbergen.pdf>.

Received 26.09.2018

© V. N. Klyushnichenko, 2018

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 631.4

О ПЛОДОРОДИИ ПОЧВ И ЕГО МОНИТОРИНГЕ В СИСТЕМЕ БИОЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Валерий Борисович Жарников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры кадастра и территориального планирования, тел. (383)361-05-66, e-mail: v.b.jarnikov@ssga.ru

Юрий Степанович Ларионов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры экологии и природопользования, e-mail: larionov42@mail.ru

Анализируется проблема плодородия почв, определяющего продуктивность современного земледелия и возможности его роста наряду с экологическими качествами на пути перехода к биологическому земледелию, минимизирующему потребление химических препаратов и повышающему роль естественных биологических процессов: сохранение целостности пахотного и других горизонтов почвы; чередование культур с различными типами корневых систем; использование поживных, поукосных культур и сидератов для поддержания баланса органического вещества, а также микробиологических препаратов, ускоряющих процессы гумификации и минерализации, проведение мелиоративных мероприятий. Определена система мониторинга плодородия почв, отдельные элементы которой требуют внимания профильных специалистов. Это касается, прежде всего, средств и методов контроля баланса органического вещества почвы, сложная динамика которого определяет процессы его сохранения, гумификации и минерализации.

Ключевые слова: почва, плодородие, сельскохозяйственное производство, экологизация, органическое вещество, гумификация, минерализация, мониторинг.

Введение

Все более актуализирующаяся проблема продовольственной обеспеченности населения и ее роль в решении задач национальной безопасности ставит ряд важных взаимообусловленных задач: повышения продуктивности сельскохозяйственного производства и одновременного снижения уровня антропогенной нагрузки на окружающую среду, в том числе на основе рационализации хозяйственной деятельности, совершенствования существующих и разработки

новых технологий, минимизирующих прямой ущерб агроландшафтам и загрязнений атмо- и гидросферы [1–3]. Особого внимания заслуживает вопрос выбора инновационной программы развития сельскохозяйственного производства взамен существующей, основанной на его интенсификации и широкой химизации. Анализ положения дел в данной сфере позволяет сделать принципиальный вывод – успешное, экологически благоприятное сельскохозяйственное производство возможно лишь на основе перехода к биологическим методам и технологиям земледелия, обусловленным ходом эволюционно- и эколого-генетического развития биосферы и поддерживаемым современными инновационными разработками, в числе которых находится научная концепция и активно развивающаяся практика «биоземледелия» [4–6], которое можно определить как систему производства экологически чистой продукции растениеводства. Биоземледелие способно, и это подтверждают практические результаты, обеспечить новый уровень плодородия почв в реальных агроэкологических условиях, лучше защитить от болезней и вредителей возделываемые растения, перейти к производству экологически чистой продукции, а также внести серьезный вклад в улучшение качества окружающей среды [7–9]. Данную ситуацию концептуально отражает закон плодородия почв [5], определяющий принципы формирования, сохранения и повышения плодородия почв (ПП) и, одновременно, особенности его мониторинга. Главное здесь состоит в следующем: ПП в реальных агроэкологических условиях поддерживается балансом органического вещества почвы, круговоротом элементов питания и водообмена, корнеоборотом растений, эдафитными и эпифитными почвенными процессами с участием основных компонентов биоты и минимизацией внесения значительных доз химических препаратов. Возможность регулирования данными процессами определяет плодородие почвы в большей степени возобновляемым ресурсом, которым человечество в состоянии целенаправленно управлять, используя для этого определенный набор механизмов, в числе которых результаты и технологии мониторинга ПП [10, 11].

Актуальность изучения почвенного плодородия, по мнению ведущих специалистов Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук [12], особо значима и определяет создание мощных научных коллективов, способных найти системное решение данной проблемы, являющейся одной из наиболее принципиальных в аграрной науке.

О состоянии аграрного сектора России

Современное состояние отечественного аграрного сектора оценивается [13] как рыночное, в основном немонополизированное, отчасти с предсказуемой государственной поддержкой. В 2016 г. страна вышла на международные аграрные рынки, при этом норма внутри российского потребления продуктов приблизилась к нормативной, рекомендованной специалистами. Дальнейшее развитие аграрного сектора связано с ростом его качественной про-

дуктивности, минимизацией ущерба агроценозам и увеличением масштаба экспорта продукции.

Современные успехи сельского хозяйства связаны с земельной реформой 1990-х гг. и серьезным вниманием государства к ее развитию [14]. Но сложившаяся структура земель и производства сельскохозяйственной продукции аномальна для мировой практики: практически не существует средних по размеру и эффективности хозяйств, малых сельхозпредприятий немного (менее 35 %), тогда как наблюдается переизбыток крупнейших агрохолдингов (более 53 %). Именно последние определяют сельскохозяйственную специфику производства, его объемы и потребляют большую часть финансовой поддержки государства. При этом деятельность агрохолдингов обуславливает негативные факторы современного аграрного производства: сложность ведения эффективного в самих агрохолдингах бизнеса; отсутствие нормальных условий для развития малого и среднего агробизнеса, особенно на территориях господства агрохолдингов; деградацию значительной части сельских, особенно малых населенных пунктов из-за высокой концентрации или полного отсутствия эффективного агропроизводства; высокую нагрузку на агроландшафты и окружающую среду, в том числе из-за использования архаичных технологий в домашних хозяйствах селян, низкую (в 3–5 раз ниже, по сравнению со среднеевропейской), производительность труда.

Тем не менее, объем отечественного сельскохозяйственного производства, особенно зерновых культур, картофеля, отдельных видов овощей, яиц, мяса птицы существенно возрос и практически превысил пределы внутреннего потребления. Дальнейшее развитие данного сектора обусловлено рядом факторов, прежде всего качеством угодий, численностью, структурой и квалификацией сельского населения, уровнем развития экономики и особенно перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию отраслей.

Оценка такого развития часто осуществляется показателем валовой добавленной стоимости (ВДС) продукции данного сектора производства. Указанный показатель в России составил в 2010–2016 гг. 4,0–4,2 % от его общеэкономического значения, в мировой сельскохозяйственной продукции его значение не превышает 2,8 % [13]. Некоторое уменьшение данного показателя в России в 2017–2018 гг. обусловлено девальвацией рубля, но при учете его паритетной способности значение ВДС, превышающей 3 %, также показывает лучшее качество отечественной продовольственной «корзины» по сравнению со многими зарубежными государствами. Поэтому дальнейшее наращивание потенциала сельскохозяйственного производства, его растениеводческого направления не только экономически выгодно, но и привлекательно по многим другим позициям.

Структура и результаты отечественного растениеводства, в том числе зерновых культур, представлены на рис. 1, 2.

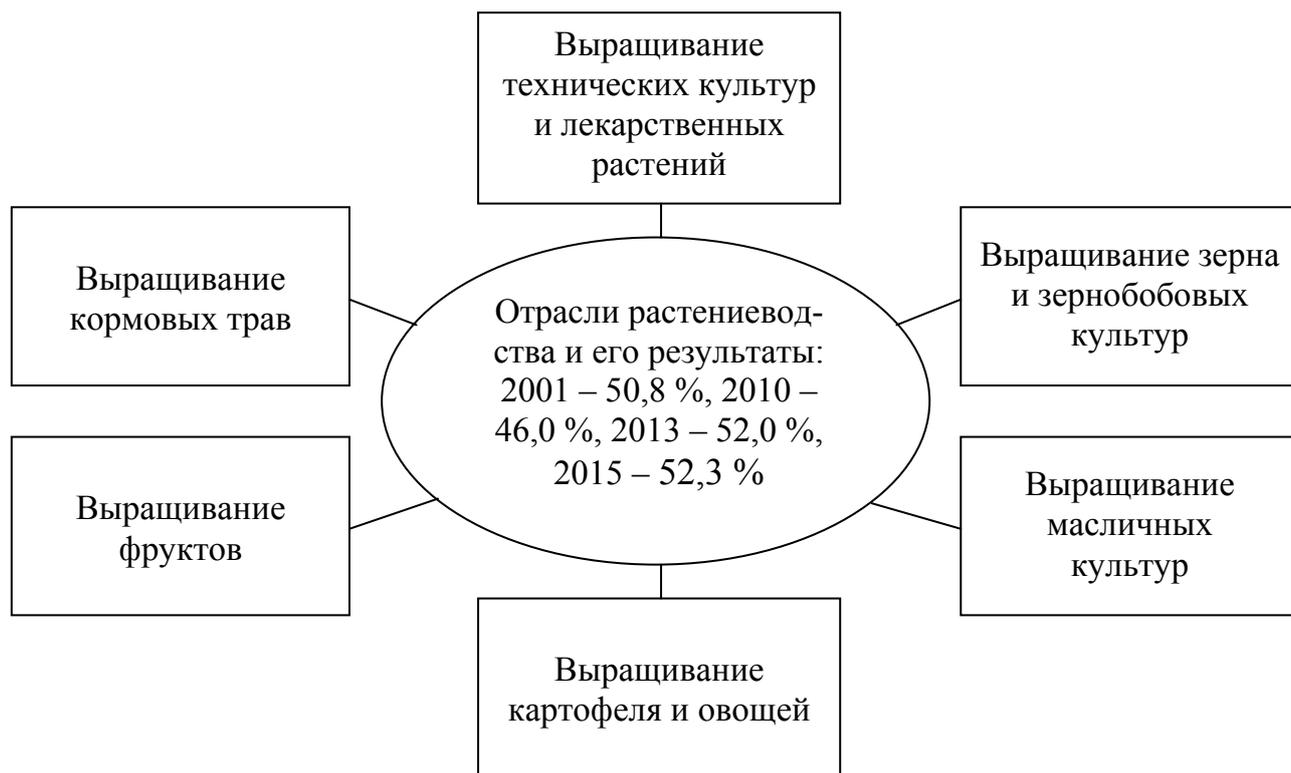


Рис. 1. Отечественное растениеводство и его результаты в 2001–2015 гг. (в процентах от общего объема сельскохозяйственной продукции)



Рис. 2. Распределение пашенных угодий под основные сельскохозяйственные культуры (по состоянию на 2014 г.):

общая площадь зерновых культур – 42,22 млн. га; общий урожай зерновых культур – 105,3 млн. т; средняя урожайность зерновых культур – 24,1 ц/га; урожай пшеницы – 39,7 млн. т

Агробиологические предпосылки совершенствования системы мониторинга ПП

Важнейшую роль в обеспечении ПП играют биологические процессы [4], и это, прежде всего, круговороты основных питающих почву элементов. Круговороты определяют роль и содержание прямых и обратных связей в звеньях агроэкологической системы, взаимосвязь почвы с другими элементами биосферы.

При этом до настоящего времени проблемной задачей остается поиск интегральных показателей качества почв, отражающий связь урожайности с плодородием почв. В агрохимии и практическом земледелии принято считать, что урожаи культур формируются преимущественно за счет минеральных элементов самой почвы, значимость же органического вещества определяют его ролью в формировании питательного режима почвы на основе его минерализации и гумификации. Считается, что ухудшение баланса гумуса, содержания углерода в почве, отсутствие оптимального сочетания элементов минерального питания для каждой культуры в конкретных почвенно-климатических и агроэкологических условиях, в определенные фазы роста и развития растений и есть главные причины недобора урожаев, низкой стабильности продуктивности земледелия [15]. Полагаем, что это очень общие представления, поскольку для каждой культуры и разнообразных агроэкологических условий для них в каждый момент времени и каждую фазу развития растений существуют свои оптимальные показатели и их соотношения. Это касается биоты почвы, ее агрофизических и геохимических качеств, свойств материнской (литологической) основы [1, 5]. В этой связи следует отметить работу [16], результатом которой стал не только анализ, но и прогноз возможностей отечественного растениеводства, масштабно выполненный с использованием компьютерного моделирования урожайности основных сельскохозяйственных культур производственными функциями.

Обобщение результатов исследований влияния органических удобрений в агрономической практике за последние десятилетия [17] показывает, что на различных видах злаковых и других видах растений в фазу кушения органические удобрения на гуминовой основе обеспечивают закладку большого числа побегов. При этом нужные количества серы, азота, бора и других веществ поступают в растения через листья и корни. Чем быстрее разворачивается рабочая листовая и корневая поверхность и чем большую площадь она будет составлять, тем эффективнее осуществляется корневое и воздушное питание растений и большее количество питательных веществ ими будет усвоено, что и ведет к увеличению урожая и его качества.

По окончании онтогенеза последующая минерализация растительных остатков увеличивает в почве содержание легко растворимых в воде калийных, азотных и фосфорных соединений, что позволяет уменьшить дозу вносимого нитратно-фосфорно-калийного (NPK) комплекса до 50–80 %. Биохимические

преобразования органических веществ в гуминовые вещества обуславливают направленные обменные процессы в растительном организме, которые приводят к стимуляции синтеза этих веществ. Напомним [4–6], что в состав почвенного органического вещества входят гуминовые, гиметомелановые и фульвокислоты. Основу последних составляет широкий спектр низкомолекулярных органических веществ, включающих аминокислоты, углеводы, водорастворимые карбоновые кислоты, витамины, а также макро- и микроэлементы в доступном для растений и других живых форм виде. Следует отметить роль гуминовых веществ, обладающих также ауксино-цитокениновым эффектом, стимулирующим рост и деление клеток, антистрессовым эффектом, повышающим устойчивость растения к климатическим, техногенным и прочим стрессам.

В процессе использования земель создаваемая фотосинтезом биомасса обеспечивает образование и накопление в почве органического вещества, гумуса, а также ряда ценных микроэлементов (меди, цинка, бора, марганца, молибдена, кобальта), которые образуют наряду с гуминовыми веществами комплексы, легко усваиваемые растениями. При этом именно гуминовые вещества наиболее эффективно транспортируют микроэлементы в растение. В этих процессах участвуют все виды биоты, для которых биомасса является необходимым источником энергии. Представленное обобщение роли органического вещества, синтезируемого растениями и видами, обитающими в почве, подчеркивает огромную роль биомассы и биоты почвы в существовании биосферы нашей планеты и составляющих ее геосфер [5, 8].

В состав растительных и животных организмов входят свыше 80 химических элементов, но лишь около 30 из них имеют вполне установленное количество и встречаются в организмах постоянно. При этом, соотношение элементов здесь иное, чем в земной коре, установленной геохимией [1, 3].

Все организмы имеют близкий химический атомный состав, в котором углерод выступает важнейшим «строительным» элементом. Например, в глюкозе содержание углерода достигает более 30 %. Это сходство не может быть объяснено распространением элемента в земной коре, где содержание углерода не превышает 0,32–0,35 %. Из известных к настоящему времени 108 химических элементов лишь немногие входят в достаточно больших количествах в состав биологических молекул. Об этом можно судить по содержанию основных биофильных элементов в биосфере, которая отражает молекулярно-химическую специфику живой материи. Так, необходимыми для всех биологических объектов являются макроэлементы: Н, С, О, N, S, P, Са, Mg, К, Na, Сl. Регулярно, но в меньших количествах, встречаются столь же необходимые для жизни микроэлементы: Си, Mn, Zn, Мо, Со, В, Cd. Целый ряд не менее важных элементов современными методами аналитической химии не обнаруживаются, в том числе по причине их незначительного содержания. Вероятно, они обеспечивают в очень короткий промежуток онтогенеза какие-то важные каталитические процессы в живых организмах. Следовательно, плодородие почвы целесообразно

рассматривать через биохимический состав живых организмов и в первую очередь растений [5], не делая главный упор на агрохимическую характеристику почвы [1–6].

Таким образом, исследование химического состава живых и неживых объектов природы показывает, что распространенность отдельных элементов среди них различна. Живые организмы способны избирательно поглощать и накапливать необходимые для них химические элементы из окружающей среды, тем самым предъявляя различные требования к плодородию почвы. При этом в живых организмах накапливаются главным образом элементы с низкими атомными массами. Однако для некоторых жизненных процессов необходимы и элементы с высокой атомной массой, например, молибден, но содержание их ничтожно.

Анализ вышеперечисленных процессов и свойств, раскрывающих физико-химическую, почвоведческую и агрономическую сущность синтезируемой в процессе фотосинтеза биомассы (органического вещества), позволяет сделать вывод, что именно органическое вещество в почве является основой ее плодородия, существования для большинства видов живых организмов и условий взаимодействия всех биогенных элементов. Органическое вещество, поступающее в почву, является источником энергии для биоты, трансформируется ею и регулирует фактически все биохимические процессы растительной клетки и многих живых организмов, обитающих в почве, и возделываемых на ней культур [1]. Оно активизирует поглощение ультрафиолетового излучения растениями и ускоряет процесс фотосинтеза в листьях. Листья приобретают интенсивную зеленую окраску, поглощая определенный спектр солнечной радиации, что используется, в частности, современной космической и аэрофотосъемкой.

Подчеркнем, что, несмотря на многочисленные научные исследования и результаты практиков, однозначного ответа на вопрос, что такое почвенное плодородие и чем оно определяется, до сих пор нет. Наши исследования [5] показывают, что основой плодородия почв является синтез биомассы в конкретных агроэкологических условиях, а потому его целесообразно рассматривать через биохимический состав живых организмов (органического вещества почвы), и, конечно, геохимический состав материнской породы и агроэкологические условия играют определенную роль в формировании почвенного плодородия, но все же решающая роль в нем, как и в процесс эволюции самой почвы, играет биомасса (органическое вещество), синтезируемое самими растениями и другой биотой почвы.

О совершенствовании системы почвенного мониторинга

В связи с вышеизложенным встает проблема организации и методически правильного осуществления мониторинга почв земель сельскохозяйственного

назначения [10, 11, 18–21]. Согласно методике [22, 23] расчет показателя почвенного плодородия осуществляется как среднее от суммы соотношений фактических значений четырех агрохимических показателей к их оптимальным значениям по всем типам почв посевных площадей сельскохозяйственных культур в субъекте Российской Федерации. В расчете учитываются следующие агрохимические показатели:

- кислотность почв (рН, ед.);
- содержание гумуса (%);
- содержание подвижных форм фосфора (P_2O_5 , мг/кг почвы);
- содержание обменного калия (K_2O , мг/кг почвы).

При этом показатель кислотности для щелочных почв $pH_{(H_2O)}$ рассчитывается как соотношение его оптимального значения к фактическому значению, для кислых почв $pH_{(KCl)}$ – фактического к оптимальному.

Одновременно видно, что учет важнейшего фактора плодородия – баланса органического вещества – в методике полностью отсутствует. Отметим, что и технологически данный вопрос пока не решен.

В этой связи с целью оценки информативности принятых показателей плодородия почв и разработки необходимых предложений на материалах Новосибирской области [24] нами проведены исследования связи урожайности зерновых культур и плодородия почв, представленные в табл. 1, 2.

Таблица 1

Оценка корреляционной связи урожайности зерновых культур с типом почв и рядом показателей их плодородия и агроэкологических условий (по материалам Новосибирской области 1993–2012 гг.)

Показатели плодородия и агроэкологических условий	Коэффициент парной корреляции	Сила связи
Запас гумуса	0,444	Слабая
Балл бонитета	0,625	Заметная
Количество осадков	0,333	Слабая
ГТК (гидротермический коэффициент)	0,146	Практически отсутствует
Черноземные почвы	0,175	Практически отсутствует
Серые оподзоленные почвы	0,341	Слабая
Болотные почвы	–0,265	Отрицательная
Луговые почвы	–0,255	Отрицательная
Солонцовые почвы	–0,341	Отрицательная

Таблица 2

Корреляционная зависимость между урожайностью зерновых культур и показателями плодородия почвы, агроэкологическими условиями в районах Новосибирской агломерации (2014–2017 гг.).

Наименование показателя	Значение корреляции
Калий	0,864
Кислотность солевая	0,837
Фосфор	0,803
Сумма активных температур	0,643
Медь	0,462
Кобальт	0,297
Молибден	0,286
Гумус	0,22
Гранулометрический состав	0,201
Солонцеватость	–0,186
Запасы гумуса в метровом слое	–0,228
Балл бонитета	–0,252
ГТК	–0,542
Кислотность водная	–0,552
Цинк	–0,66
Марганец	–0,926

Установленные парные коэффициенты корреляции (см. табл. 1) между урожайностью посевов зерновых культур и типами почв, различающихся по агрохимической оценке плодородия, показывают, что степень их влияния на урожайность у большинства почв незначительная. Это связано, по-видимому, с тем, что на урожайность влияют ряд других, не рассматриваемых методикой показателей (запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы, наличие подвижных элементов питания, биологическая активность почвы, ее водно-физические свойства, сумма активных температур и др.). На урожайность также влияют технологические приемы возделывания зерновых культур, такие как нормы посева, сроки посева, внесение удобрений и другие, значения коэффициентов корреляции с которыми также невысокие и, следовательно, значимость используемых агрохимических и агроэкологических показателей в принятой системе оценки плодородия и бонитета почв также невысока. В то же время корреляционная связь между общей надземной биомассой (ц/га) и ее частью, оставляемой в виде сидеральных удобрений или пожнивных остатков и урожайностью зерновых культур в районах Новосибирской агломерации, может

быть оценена как высокая. Наиболее значимыми (см. табл. 2) из принятых показателей плодородия почв и агроэкологических условий являются содержание подвижных форм фосфора и калия, кислотность солевая (pH_{KCl}), агроэкологический показатель суммы активных температур.

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- современное сельское хозяйство и его растениеводство являются важнейшими социальными и экономическими категориями, в значительной степени определяющими динамику развития России;
- эффективность растениеводства обусловлена рядом факторов, основным из которых является почвенное плодородие, регулируемое человеком и способное в парадигме биоземледелия и реализации возможностей закона плодородия почвкратно увеличить итоговую урожайность основных сельскохозяйственных культур;
- механизмом оценки состояния качества почв и уровня плодородия является соответствующий мониторинг, содержание которого должно в большей степени соответствовать базовым факторам плодородия, в частности, балансу и активности почвенного органического вещества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Березин Л. В., Кленов Б. М., Леонова В. В. Экология и биология почв. – Омск : ОмГАУ, 2008. – 122 с.
2. Каштанов А. Н. Сохраним и преумножим плодородие земли // Земледелие. – 1999. – № 3. – С. 7–8.
3. Татаринцев Л. М., Татаринцев В. Л., Кирякина Ю. Ю. Организация современного землепользования на эколого-ландшафтной основе : монография. – Барнаул : Изд-во АГАУ, 2011. – 106 с.
4. Конев А. А. Система биологизации земледелия. – Новосибирск : НГАУ, 2004. – 51 с.
5. Ларионов Ю. С. Биоземледелие и закон плодородия почв. – Омск : СГГА, ОмГАУ, 2012. – 207 с.
6. Яшутин Н. В., Дробышев А. П., Хоменко А. И. Биоземледелие (научные основы, инновационные технологии и машины). – Барнаул : АГАУ, 2008. – 191 с.
7. Киреев А. К. Концепция развития систем земледелия Казахстана // Глобальные изменения климата и биоразнообразия : материалы II Международного конгресса. – Алматы : КазНИИЗиР, 2015. – С. 108–112.
8. Ларионов Ю. С. Альтернативные подходы к современному земледелию и наращиванию плодородия почв (новая парадигма) // Вестник СГГА. – 2013. – Вып 1 (21). – С. 49–60.
9. Рунов Б. А., Пильникова Н. Основы технологии точного земледелия: зарубежный и отечественный опыт. – М. : Росинформагротех, 2010. – 120 с.
10. Захарова Н. И. Мониторинг почв земель сельскохозяйственного назначения : сущность, цели и задачи // Вестник ПАГС. – 2012. – № 312. – С. 117–121.
11. Жарников В. Б., Ларионов Ю. С. Мониторинг плодородия земель сельскохозяйственного назначения как механизм их рационального использования // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 203–210.

12. Методология системного проведения научных исследований в растениеводстве, земледелии и защите растений : метод. положения / П. А. Гончаров, Г. П. Гамзиков, В. К. Каличкин, А. Ф. Ашмарина, Ю. А. Христоф. – Новосибирск : СО РАСХН, 2014. – 77 с.
13. Шагайда Н. И., Узун В. Я. Тенденции развития и основные вызовы аграрного сектора России : аналитический доклад. – М. : РАНХиГС, 2016. – 82 с.
14. Аграрная реформа в постсоветской России. – М. : Депо, 2015. – 352 с.
15. Ковалев Н. Г., Зинковская Т. С. Биологические и агрохимические показатели осушаемых почв в различные по увлажненности годы // Материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Методы оценки сельскохозяйственных рисков и технологии смягчения последствий изменения климата в земледелии» (Санкт-Петербург, 13–14 октября 2011 г.). – СПб. : АФИ, 2011. – С. 67–70.
16. Ларионов Ю. С., Стуканов А. А., Конева А. В. Инновационные подходы к развитию АПК на основе биоземледелия и закона плодородия почв // Информационные технологии, системы и приборы в АПК: материалы 7-й Международной научно-практической конференции «АГРОИНФО-2018» (Новосибирская обл., р.п. Краснообск, 24–25 октября 2018 г.). – Новосибирск : Академиздат, 2018. – С. 542–547.
17. Комарова Н. А. Влияние различных паров на показатели почвенного плодородия // Инновационные технологии в АПК Евро-Северо-Востока РФ : сборник научных трудов к 75-летию Нижегородского научно-исследовательского института сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук. – Нижний Новгород : Дятловы горы, 2011. – С. 127–132.
18. Красницкий В. М., Шмидт А. Г. Динамика плодородия пахотных почв Омской области и эффективность использования средств его повышения в современных условиях // Достижения науки и техники АПК. – 2016. – № 7. – С. 34–37.
19. Садикова Г. С., Бурханова Д. У. Изменение показателей плодородия орошаемых луговых почв под влиянием биоудобрений // Аграрная наука – сельскому хозяйству : IX Международная научно-практическая конференция : сборник статей в 3 кн. – Барнаул : АГАУ, 2014. Кн. 2. – С. 237–239.
20. Система показателей оценки экологической емкости агроландшафтов для формирования экологически устойчивых агроландшафтов / Н. П. Масютенко, Н. А. Чуян, Г. И. Бахирев и др.; Рос. акад. с.-х. наук, Всерос. науч.-исслед. ин-т земледелия и защиты почв от эрозии. – Курск: ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2011. – 42 с.
21. Оценка почвенного плодородия по данным дистанционного зондирования / А. А. Савельев, Б. Р. Григорьян, Д. В. Добрынин, С. С. Мухарамина, В. И. Кулагина, И. А. Сахабиев // Ученые записки Казанского университета. – 2012. – Т. 154, кн. 3. – С. 158–172.
22. Об утверждении Порядка осуществления государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения [Электронный ресурс] : приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 24.12.2015 № 664. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
23. Методика расчета почвенного плодородия [Электронный ресурс] : Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 06.07.2017 № 32. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
24. Министерство сельского хозяйства НСО [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mex.nso.ru/>.

Получено 25.10.2018

© В. Б. Жарников, Ю. С. Ларионов, 2018

ABOUT SOIL FERTILITY AND ITS MONITORING IN BIOFARMING SYSTEM

Valeriy B. Zharnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Cadastre and Territorial Planning, phone: (383)361-05-66, e-mail: v.b.jarnikov@ssga.ru

Yurij S. Larionov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Department Ecology and Environmental Management, e-mail: larionov42@mail.ru

The article analyses soil fertility problem, determining the productivity of modern agriculture and the possibilities of its growth together with ecological qualities while going to biological agriculture, minimizing the consumption of chemicals and increasing the role of natural biological processes: preservation of ploughing and others horizons of soil; alternation of plant crops with different root system types; use of postharvest crops and green manure crops for balance control of organic substance, carrying out agroforest melioration activities, and also using microbiological specimen, accelerating the processes of organic humification and mineralization. The article defines the soil fertility monitoring system, some particular elements of which require the attention of subject matter experts. Particularly it concerns means and methods of organic balance control of soil, whose complicated dynamics defines the processes of its preservation, humification and mineralization.

Key words: soil, fertility, agricultural industry, environmentalization, fecal organic matter, humification, mineralization, monitoring.

REFERENCES

1. Berezin, L. V., Klenov, B. M., & Leonova, V. V. (2008). *Ehkologiya i biologiya pochv [Ecology and soil biology]*. Omsk: OmGAU Publ., 122 p. [in Russian].
2. Kashtanov, A. N. (1999). Keep and multiply the fertility of the earth. *Zemledelie [Agriculture]*, 3, 7–8 [in Russian].
3. Tatarincev, L. M., Tatarincev, V. L., & Kiryakina, Yu. Yu. (2011). *Organizaciya sovremennogo zemlepol'zovaniya na ehkologo-landshaftnoj osnove [The organization of modern land use on the ecological-landscape basis]*. Barnaul: AGAU Publ., 106 p. [in Russian].
4. Konev, A. A. (2004). *Sistema biologizatsii zemledeliya [The system of biologization of agriculture]*. Novosibirsk: Novosibirsk GAU Publ., 51 p. [in Russian].
5. Larionov, Yu. S. (2012). *Biozemledeliye i zakon plodorodiya pochv [Biozemusleie and the law of soil fertility]*. Omsk: SSGA Publ., OmGAU Publ., 207 p. [in Russian].
6. Yashutin, N. V., Drobyshev, A. P., & Khomenko, A. I. (2008). *Biozemledeliye (nauchnyye osnovy, innovatsionnyye tekhnologii i mashiny) [Bio-farming (scientific foundations, innovative technologies and machines)]*. Barnaul: AGAU Publ., 191 p. [in Russian].
7. Kireyev, A. K. (2015). The concept of development of agriculture systems in Kazakhstan In *Sbornik materialov II Mezhdunarodnogo kongressa: Global'nyye izmeneniya klimata i bioraznoobraziya [Proceedings of the II International Congress: Global Climate Change and Biodiversity]* (pp. 108–112). Almaty: KazNII ZiR Publ. [in Russian].
8. Larionov, Yu. S. (2013). Alternative approaches to the modern soil cultivation and improvement of soil fertility (new paradigm). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(21), 49–60 [in Russian].

9. Runov, B. A., & Pil'nikova, N. (2010). *Osnovy tekhnologii tochnogo zemledeliya: zarubezhnyy i otechestvennyy opyt* [Basics of precision farming technology: foreign and domestic experience]. Moscow: Rosinformagrotekh Publ., 120 p. [in Russian].
10. Zakharova, N. I. (2012). Monitoring of Agricultural Land Soils: the Subject Matter, Targets, and Tasks. *Vestnik PAGS* [The Bulletin of the Volga Region Institute of Administration], 31, 227–221 [in Russian].
11. Larionov, Ju. S., & Zharnikov, V. B. (2017). Soil fertility monitoring of agricultural purpose lands as a mechanism of their rational use. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 22(1), 203–210 [in Russian].
12. Goncharov, P. A., Gamzikov, G. P., Kalichkin, V. K., Ashmarina, A. F., & Khristof, Yu. A. (2014). *Metodologiya sistemnogo provedeniya nauchnykh issledovaniy v rasteniyevodstve, zemledelii i zashchite rasteniy* [Methodology of systematic research in crop production, agriculture and plant protection: methodological provisions]. Novosibirsk: Siberian Branch of Russian Academy of the Agricultural Sciences Publ., 77 p. [in Russian].
13. Shagayda, N. I., & Uzun, V. Ya. (2016). *Tendentsii razvitiya i osnovnyye vyzovy agrarnogo sektora Rossii* [Tendencies of development and main challenges of the agricultural sector of Russia]. Moscow: RANEPА Publ., 82 p. [in Russian].
14. *Agrarnaya reforma v postsovetskoy Rossii* [Agrarian reform in post-Soviet Russia]. (2015). Moscow: Depo Publ., 352 p. [in Russian].
15. Kovalev, N. G., & Zinkovskaya, T. S. (2011). Biological and agrochemical indicators of drained soils in different wet years. In *Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: Metody otsenki sel'skokhozhshchaystvennykh riskov i tekhnologii smyagcheniya posledstviy izemenniya klimata v zemledelii* [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation: Methods for Assessing Agricultural Risks and Technologies for Mitigating the Effects of Climate Change in Agriculture] (pp. 67–70). St. Petersburg: API Publ. [in Russian].
16. Zharnikov, V. B., Larionov, Yu. S., Stukanov, A. A., & Koneva, A. V. (2018). Innovative approaches to the development of the agro-industrial complex based on bio-farming and the law of soil fertility. In *Sbornik materialov 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "AGROINFO-2018": Innovatsionnyye podkhody k razvitiyu APK na osnove biozemledeliya i zakona plodorodiya pochv* [Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference "AGROINFO-2018": Information Technologies, Systems and Devices in the Agro-Industrial Complex] (pp. 542–547). Novosibirsk region, Krasnoobsk: Academic Publ. [in Russian].
17. Komarova, N. A. (2011). Influence of various vapors on indicators of soil fertility. In *Sbornik nauchnykh trudov k 75-letiyu Nizhegorodskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyaystva Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk: Innovatsionnyye tekhnologii v APK Yevro-Severo-Vostoka RF* [Collection of Scientific Papers to the 75th Anniversary of the Nizhny Novgorod Research Institute of Agriculture of the Russian Academy of Agricultural Sciences: Innovative Technologies in the Agroindustrial Complex of Euro-North-East of the Russian Federation] (pp. 127–132). Nizhny Novgorod: Dyatlov Mountains Publ. [in Russian].
18. Krasnitsky, V. M., & Schmidt, A. G. (2016). Dynamics of Fertility of Arable Soils in Omsk Region and Efficiency of Use of Means for Its Increase under Modern Conditions *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of AICis], 7, 34–37 [in Russian].
19. Sadikova, G. S., & Burkhanova, D. U. (2014). The change in the fertility indicators of irrigated meadow soils under the influence of bio-fertilizers. In *Sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Kniga 2. Agrarnaya nauka – sel'skomu khozyaystvu* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference: Book 2. Agrarian Science to Agriculture] (pp. 237–239). Barnaul: AGAU Publ. [in Russian].

20. Masyutenko, N. P., Chuyan, N. A., Bakhirev G. I. & etc. (2011). *Sistema pokazateley otsenki ekologicheskoy yemkosti agrolandshaftov dlya formirovaniya ekologicheski ustoychivyykh agrolandshaftov [The system of indicators for assessing the ecological capacity of agricultural landscapes for the formation of environmentally sustainable agricultural landscapes]*. Kursk: All-Russian Research Institute of Agriculture and Soil Protection Against Erosion Russian Academy of the Agricultural Sciences Publ., 42 p. [in Russian].

21. Saveliev, A. A., Grigorian, B. R., Dobrynin, D. V., Mukharamina, S. S., Kulagina, V. I., & Sakhbiev, I. A. (2012). Earth remote sensing for soil fertility monitoring. *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta [Scientific Notes of the Kazan University]*, 154(3), 158–172 [in Russian].

22. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 24, 2015 No. 664. On approval of the Procedure for the implementation of state monitoring of agricultural lands Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

23. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated July 6, 2017 No. 32. Method of calculating soil fertility. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

24. Ministry of Agriculture of the Novosibirsk Region. (n. d.). Retrieved from <https://mcx.nso.ru/>.

Received 25.10.2018

© V. B. Zharnikov, Yu. S. Larionov, 2018

УДК 574:002.56

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СВОЙСТВ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА

Ирина Викторовна Михеева

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)363-90-13, e-mail: mikheeva@issa.nsc.ru

Алексей Александрович Оплеухин

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)363-90-13, e-mail: plymbym@ Rambler.ru

При мониторинге состояния природных объектов и экологических систем под влиянием климатических изменений и антропогенных воздействий необходимо проведение анализа и сравнения в различные моменты времени вариабельности континуальных в пространстве свойств объектов, что особенно важно для оценки состояния почв. Предыдущие исследования показали, что структура вариабельности свойств почв под влиянием природных и антропогенных процессов перестраивается, что приводит к изменению функций их вероятностных распределений. Анализ вариабельности свойства природного объекта может быть осуществлен путем идентификации его вероятностно-статистической модели, характеризующейся определенным типом и параметрами математической функции вероятностного распределения, или вероятностно-статистическим распределением (ВСП). ВСП является наиболее точным и полным статистическим эталоном изучаемого свойства объекта. Для скалярной целостной оценки вариабельности и ее изменений нами было предложено использовать информационные характеристики, вычисляемые на основе ВСП. Для информационной характеристики меры неопределенности значений свойств объекта используется информационная энтропия, а для оценки различий – информационная дивергенция. На примере почв показана возможность использования свободного программного обеспечения для статистического анализа атрибутивных данных геосистем. В статье рассмотрены этапы статистического анализа и программные особенности идентификации ВСП, а также расчетов их информационных характеристик при использовании свободного программного обеспечения. Приведен список наиболее часто определяемых вероятностных распределений почвенных свойств и их представление в программной среде R. Рассмотрены примеры расчетов на фактических данных мониторинга почв юга Западной Сибири.

Ключевые слова: мониторинг, свойства почв, базы данных, вероятностно-статистические модели, статистический эталон, информационные характеристики, свободное программное обеспечение.

Введение

Для развития прорывного мышления в геопространственной деятельности, в том числе в области сельского хозяйства и экологии, необходим переход от информационной функциональности на более высокий уровень аналитической функциональности [1]. Как отмечают авторы, такой прорыв возможен на базе научно-технического прогресса в сфере аппаратно-программных систем, обес-

печивающих сбор данных из разнородных источников, автоматизации процессов обработки и распознавания информации, а также формирования баз данных с распределенным доступом к ней. Для более успешного применения новых технических аппаратно-программных средств, по нашему мнению, необходимо развитие математического информационного «языка» фундаментальных наук о геосистемах. С одной стороны, это важно для развития самих фундаментальных научных дисциплин, с другой – позволяет практически реализовать аналитическую функциональность геопространственной информации, поскольку она базируется на закономерностях, полученных в научных исследованиях.

В почвоведении за последние десятилетия сформировалось направление «педометрика», целью которого является развитие математических, в том числе статистических методов анализа, оценки свойств почв и почвенного покрова, моделирования, в том числе пространственного, почвенных свойств и процессов [2].

Формирование баз атрибутивных данных о свойствах геопространственных экологических систем является очень важным этапом для совершенствования геопространственной деятельности. Для анализа этих данных с целью управления экологическими системами необходима организация преемственности наследия данных (legacy data). Наследие данных является основой для строгой аналитической математической оценки изменений состояния экологических систем, в том числе почв, что позволяет выявить тенденции развития современных процессов в почвенном покрове. Процессы современной эволюции экологических систем происходят под влиянием антропогенной деятельности и естественных климатических и природных изменений, при этом характеристики систем изменяются не только в пространстве, но и во времени.

Почвы являются центральным звеном всех наземных экосистем, поэтому информация о почвенном покрове и состоянии почв является важной составляющей для управления сельским хозяйством и эколого-природохозяйственной деятельностью. В связи с этим на значительных площадях сельскохозяйственной зоны Российской Федерации и стран бывшего СССР в разные годы проводились крупномасштабные территориальные исследования почв [3]. К сожалению, далеко не все полученные в этих исследованиях атрибутивные данные о почвенном покрове были введены в компьютерные базы данных, хотя они являются национальным наследием данных и имеют большое значение как точка отсчета для оценки произошедших за последние два-три десятилетия изменений почв и моделирования современных процессов.

Почвы являются континуальными объектами, и свойства любой почвенной разновидности на определенной территории сильно варьируют. Более того, вариабельность даже на выровненной территории присуща почве как объекту [4]. При этом данные вариации отображают не только стохастические колебания, но и вполне закономерные, связанные, например, с рельефом, характером подстилающей породы или естественной неоднородностью, присущей структуре почвы. Поэтому данные о почвенной вариабельности должны быть отображены

в базах почвенных данных. При этом анализировать необходимо не только текущее состояние почвенных объектов, но и изменения во времени, вызванные происходящими процессами современной эволюции. Для решения этих задач мы развиваем новые вероятностно-статистические и информационные представления, модели и закономерности почв [5].

Работа со статистической выборкой связана, как правило, с редукцией информации и характеристикой выборки при помощи среднего значения (или медианы) с учетом отклонений от него. В этом случае полученное среднее значение представляет совокупную характеристику выборки, а дисперсия (либо другой иной сходный по смыслу показатель) представляет меру отклонений значений выборки. Во многих случаях такой подход обоснован. Однако существуют задачи, в которых столь сильная редукция данных выборки нежелательна или недопустима, поскольку приводит к искажению статистических характеристик.

В задачах мониторинга при сравнении сходных выборок по прошествии времени степень изменчивости может служить более тонкой общей мерой произошедших изменений. Из этих предпосылок возникает задача анализа и сравнения вариаций значений выборки. Одним из способов анализа вариации является анализ вероятностного распределения, то есть фактически построение вероятностной модели распределения значений выборки. Использование полученной непрерывной модели позволяет компактно сохранять данные о вариабельности почвенного свойства для дальнейшего использования в математических моделях состояния почв и их изменений [6, 7]. Для скалярной оценки меры неопределенности значений распределения используется информационная энтропия, а для сравнения распределений – информационная дивергенция [8, 9].

Отмечая важность применения новых аппаратных и программных комплексов, необходимо заметить, что в настоящее время существует два направления использования и развития программных средств для геоинформационных аналитических исследований. Во-первых, использование, как правило, коммерческих и дорогостоящих программных систем, обладающих значительной универсальностью и развитым интерфейсом. Во-вторых, использование и развитие свободного программного обеспечения (free share), о чем говорит опыт зарубежных коллег, показывающий, что как в процессе обучения, так и в исследовательской деятельности широко развиваются использование и разработка некоммерческих программных средств, например в свободно распространяемой мощной статистической среде R [10]. Научные математические подходы для решения определенных задач, развиваемые отдельными исследовательскими группами, заложенные в свободном программном обеспечении, учитывают актуальные современные тенденции математических методов исследований. Поэтому такой подход оказывается более лабильным и новаторским. Он может успешно применяться как в образовательной, так и в исследовательской и производственной деятельности.

Построение модели вероятностного распределения

Построение модели вероятностного распределения на практике происходит путем идентификации наиболее близких известных вероятностных распределений. Идентификация распределения состоит из ряда этапов:

- 1) выбираются несколько статистических распределений, наиболее подходящих для исследуемых данных;
- 2) по данным выборки производится оценка параметров выбранных распределений;
- 3) для каждого распределения проверяется по выбранным критериям гипотеза о согласии выборочного и теоретического распределения;
- 4) исходя из совокупности показателей критериев, выбирается теоретическое статистическое распределение, наиболее близко аппроксимирующее выборочное.

Группирование

Для осуществления описанных выше операций исходные данные необходимо предварительно сгруппировать. Это предполагает ранжирование данных с последующим разбиением интервала варьирования выборки на непересекающиеся подынтервалы с подсчетом количества измерений, попавших в каждый из подынтервалов. Существует несколько способов разбиения, например, разбиение на интервалы равной длины либо равной вероятности, а также асимптотически оптимальное группирование. От выбора способа группирования наблюдений зависит размер потерь информации, неизбежный при группировании. Постановка задачи асимптотически оптимального группирования вытекает непосредственно из асимптотических свойств оценок и критериев. Ее решение, минимизирующее потери в количестве информации Фишера, повышает качество статистических выводов как при оценивании, так и при проверке гипотез. По этой причине асимптотически оптимальное группирование зачастую является наиболее удачным способом группирования [11].

Асимптотическая дисперсионная матрица оценки максимального правдоподобия (ОМП) по группированным наблюдениям определяется соотношением

$$D(\hat{\theta})N^{-1}M_{\Gamma}^{-1}(\hat{\theta}), \quad (1)$$

где

$$M_{\Gamma}(\hat{\theta}) = \sum_{i=1}^k \frac{\nabla P_i(\hat{\theta}) \nabla^T P_i(\hat{\theta})}{P_i(\hat{\theta})} \quad (2)$$

– информационная матрица Фишера по группированным данным. Элементы информационной матрицы зависят от граничных точек интервалов, так как

$$P_i(\theta) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x, \theta) dx. \quad (3)$$

В случае, когда функция плотности распределения определяется скалярным параметром или осуществляется оценивание только одного параметра при известных остальных, целью задачи асимптотически оптимального группирования является минимизация асимптотической дисперсии ОМП по группированным данным. Эта задача сводится к максимизации информационного количества Фишера о параметре по группированной выборке, т. е. к решению задачи

$$\max_{x_0 < x_1 < \dots < x_{k-1} < x_k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial \ln P_i(\theta)}{\partial \theta} \right)^2 P_i(\theta). \quad (4)$$

При оценивании вектора параметров используется информационная матрица. В этом случае в качестве критериев оптимальности могут быть выбраны различные функционалы от асимптотической дисперсионной матрицы, однако обычно минимизируют обобщенную асимптотическую дисперсию

$$\max_{x_0 < x_1 < \dots < x_{k-1} < x_k} \det M_{\Gamma}(\theta).$$

Оценка параметров распределений

После проведения группирования возможно приступить к оценке параметров выбранных распределений. Поскольку в научной литературе приняты разные обозначения параметров функций распределений, то для удобства в нашей работе используются стандартизованные – $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$. Параметр θ_0 – характеристика смещения (это аналог среднего значения для нормального распределения), θ_1 – рассеяния (это аналог дисперсии), θ_2, θ_3 – это параметры формы. Параметры формы есть не у всех распределений, но, например, у распределения Вейбулла – один параметр формы, у распределения Джонсона – два. В таблице приведены формулы функций вероятностных распределений почвенных свойств, которые были определены в результате наших исследований на основе фактических данных, а также их представление в R.

Определяющими факторами при выборе метода оценивания являются структура представления наблюдаемых данных и качество оценок. Качество оценок определяется такими свойствами, как состоятельность и асимптотическая эффективность. При учете введенной К. Р. Рао эффективности второго порядка метод максимального правдоподобия предпочтителен. Кроме того, метод является наиболее универсальным по отношению к форме представления выборочных данных (структуре выборки), по которым оцениваются параметры. Метод, в отличие от других, позволяет находить оценки максимального правдоподобия (ОМП) параметров по негруппированным, частично группированным и группированным данным [11].

Вероятностные распределения для моделирования свойств почв

Название	Формула*	Область определения	Представление в R**
1. Равномерное			dunif(x,min,max)
2. Экспоненциальное	$f(x) = \frac{1}{\theta_1} e^{-\frac{1}{\theta_1}(x-\theta_0)}$	$x \in [\theta_0, \infty)$	(1/b)* exp(1)^((-1/b)*(x-a))
3. Полунормальное	$f(x) = \frac{1}{\theta_0} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{x(x-\theta_1)^2}{2\theta_0^2}}$	$x \in (0, \infty)$	(1/b)*sqrt(2/pi)*exp(1)^(-1*(((x-a)^2/(2*b^2))))
4. Релея	$f(x) = \frac{x}{\theta_1^2} e^{-\frac{x^2}{2\theta_1^2}}$	$x \in [0, \infty)$	(x/b^2)* exp(1)^(-1*((x^2)/(2*b^2))))
5. Максвелла	$f(x) = \frac{4}{\theta_1^3 \sqrt{\pi}} (x - \theta_0) e^{-\frac{(x-\theta_0)^2}{\theta_1^2}}$	$x \in (\theta_0, \infty)$	(4/((b^3)*sqrt(pi)))*(x-a)*exp(1)^(-1*(((x-a)^2)/(b^2))))
6. Парето	$f(x) = \theta_2 \theta_0^{\theta_2} x^{-\theta_2-1}$	$x \in [\theta_0, \infty)$	dpareto(x,a,c) *VGAM c*a^c*x^(-1*c-1)
7. Эрланга	$f(x) = \frac{(x - \theta_0)^{\theta_2-1}}{\theta_1^{\theta_2} \Gamma(\theta_2)} \exp\left(-\frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)$	$x \in (\theta_0, \infty)$	(((x-a)^(c-1))/((b^c)*gamma(c))) *exp(1)^(-1*((x-a)/b))
8. Лапласа	$f(x) = \frac{1}{2\theta_1} e^{-\frac{ x-\theta_0 }{\theta_1}}$	$x \in (-\infty, \infty)$	dlaplace(x,a,b) *VGAM ** extraDistr (1/(2*b))*exp(-1*abs(x-a)/b)
9. Нормальное	$f(x) = \frac{1}{\theta_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\theta_0)^2}{2\theta_1^2}}$	$x \in (-\infty, \infty)$	dnorm(x,a,b)

Название	Формула*	Область определения	Представление в R**
10. Логарифмически нормальное	$f(x) = \frac{1}{x\theta_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \theta_0)^2}{2\theta_1^2}}$	$x \in (0, \infty)$	dlnorm(x,a,b)
11. Коши	$f(x) = \frac{\theta_1}{\pi(\theta_1^2 + (x - \theta_0)^2)}$	$x \in (-\infty, \infty)$	dcauchy(x,a,b)
12. Логистическое	$f(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1}\right)}$	$x \in (-\infty, \infty)$	dlogis(x,a,b)
13. Вейбулла	$f(x) = \frac{\theta_2(x - \theta_0)}{\theta_1^{\theta_2}} \exp\left(-\left(\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1}\right)^{\theta_2}\right)$	$x \in (\theta_0, \infty)$	((c*((x-a)^(c-1)))/b^c)*exp(1)^(-1*((x-a)/b)^c)
14. Минимального значения	$f(x) = \frac{1}{\theta_1} \exp\left(\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1} - \exp\left(\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1}\right)\right)$	$x \in (-\infty, \infty)$	(1/b)*exp(1)^((x-a)/b-exp(1)^((x-a)/b))
15. Максимального значения	$f(x) = \frac{1}{\theta_1} \exp\left(-\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1} - \exp\left(-\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1}\right)\right)$	$x \in (-\infty, \infty)$	(1/b)*exp(1)^((-1*(x-a)/b)-exp(1)^(-1*((x-a)/b)))
16. Накагами	$f(x) = \frac{2}{\Gamma(\theta_2)} \left(\frac{\theta_2}{\theta_1^2}\right)^{\theta_2} (x - \theta_0)^{2\theta_2-1} \exp\left(-\frac{\theta_2(x - \theta_0)^2}{\theta_1^2}\right)$	$x \in (\theta_0, \infty)$	(2/gamma(c))*((c/(b^2))^c)*((x-a)^(2*c-1))*exp(1)^(-1*((c*((x-a)^2))/(b^2)))
17. Гамма	$f(x) = \frac{(x - \theta_0)^{\theta_2-1}}{\theta_1^{\theta_2}\Gamma(\theta_2)} \exp\left(-\frac{(x - \theta_0)}{\theta_1}\right)$	$x \in (\theta_0, \infty)$	((x-a)^(c-1))/((b^c)*gamma(c))*exp(1)^(-1*((x-a)/b))
18. Бета 1-го рода	$f(x) = \frac{1}{\theta_1 B(\theta_2, \theta_3)} \left(\frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)^{\theta_2-1} \left(1 - \frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)^{\theta_3-1}$	$x \in [\theta_0, \theta_0 + \theta_1]$	(1/(b*beta(c,d)))*(((x-a)/b)^(c-1))*(1-((x-a)/b))^(d-1)

Название	Формула*	Область определения	Представление в R**
19. Бета 2-го рода	$f(x) = \frac{\theta_1}{B(\theta_2, \theta_3)} \frac{(\theta_1(x - \theta_0))^{\theta_2-1}}{(1 + \theta_1(x - \theta_0))^{\theta_2+\theta_3}}$	$x \in [\theta_0, \infty)$	$(b/\text{beta}(c,d))*(((b*(x-a))^c-1)/((1+b*(x-a))^c-d))$
20. Бета 3-го рода	$f(x) = \frac{\theta_4^{\theta_2} \Gamma(\theta_2 + \theta_3) \left(\frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)^{\theta_2-1} \left(1 - \frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)^{\theta_3-1}}{\theta_1 \Gamma(\theta_2) \Gamma(\theta_3) \left(1 + (\theta_4 - 1) \frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)^{\theta_2+\theta_3}}$	$x \in (\theta_0, \theta_0 + \theta_1)$	$((g^c)*\text{gamma}(c+d))/(b*\text{gamma}(d)*\text{gamma}(c))*(((x-a)/b)^{d-1})*((1-((x-a)/b))^{c-1})/(((1+(g-1)*((x-a)/b))^{c+d}))$
21. Sb-Джонсона	$f(x) = \frac{\theta_3 \theta_1}{\sqrt{2\pi}(x - \theta_0)(\theta_1 - x + \theta_0)} \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\theta_2 + \theta_3 \ln\left(\frac{x - \theta_0}{(\theta_1 - x + \theta_0)}\right)\right)^2\right)$	$x \in [\theta_0, \theta_1 + \theta_0]$	dJohnsonSB(x,c,d,a,b) * ExtDist $((d*b)/(\text{sqrt}(2*\text{pi})*(x-a)*(b-x+a)))*\exp(-0.5*(c+d*\log((x-a)/(b-x+a),\text{base}=\exp(1)))^2)$
22. Sl-Джонсона	$f(x) = \frac{\theta_3}{\sqrt{2\pi}(x - \theta_0)} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\theta_2 + \theta_3 \ln\left(\frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)\right)^2\right)$	$x \in [\theta_0, \infty)$	$(d*\exp(1)^{((-1*(c+d*\log((x-a)/b,\text{base}=\exp(1)))^2)/2}))/((x-a)*\text{sqrt}(2*\text{pi}))$
23. Su-Джонсона	$f(x) = \frac{\theta_3}{\sqrt{2\pi}\sqrt{(x - \theta_0)^2 + \theta_1^2}} \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\theta_2 + \theta_3 \ln\left(\frac{x - \theta_0}{\theta_1} + \sqrt{\left(\frac{x - \theta_0}{\theta_1}\right)^2 + 1}\right)\right)^2\right)$	$x \in (-\infty, \infty)$	dJohnsonSU(x,c,d,a,b) * ExtDist $(d*\exp(1)^{((-1*(c+d*\log((x-a)/b+\text{sqrt}(((x-a)/b)^2+1),\text{base}=\exp(1)))^2)/2}))/(\text{sqrt}(2*\text{pi})*\text{sqrt}((x-a)^2+b^2))$

Название	Формула*	Область определения	Представление в R**
24. Двустороннее экспоненциальное	$f(x) = \frac{\theta_2 e^{-\left(\frac{ x-\theta_0 }{\theta_1}\right)^{\theta_2}}}{2\theta_1 \Gamma\left(\frac{1}{\theta_2}\right)}$	$x \in (-\infty, \infty)$	$(c * \exp(1)^{-1 * ((\text{abs}(x-a)/b)^c)}) / (2 * b * \text{gamma}(1/c))$
25. Н-распределение	$f(x) = \frac{\theta_2 \left(\frac{ x-\theta_0 }{\theta_1}\right)^{\theta_2 \theta_3 - 1} \exp\left(-\left(\frac{ x-\theta_0 }{\theta_1}\right)^{\theta_2}\right)}{2\theta_1 \Gamma(\theta_3)}$	$x \in (-\infty, \infty)$	$(c * (((\text{abs}(x-a))/b)^{c*d-1})) / (2 * b * \text{gamma}(d)) * \exp(-1 * (((\text{abs}(x-a))/b)^c))$
26. Г-распределение	$f(x) = \frac{\theta_3}{\theta_1 \Gamma(\theta_2)} \left(\frac{ x-\theta_0 }{\theta_1}\right)^{\theta_3 \theta_2 - 1} \exp\left(-\left(\frac{ x-\theta_0 }{\theta_1}\right)^{\theta_3}\right)$	$x \in (\theta_0, \infty)$	$(d / (b * \text{gamma}(c))) * (((\text{abs}(x-a))/b)^{d*c-1}) * \exp(-1 * (((\text{abs}(x-a))/b)^d))$
27. L-распределение	$f(x) = \frac{\exp\left(-\theta_3 \frac{x-\theta_0}{\theta_1}\right)}{\theta_3 B(\theta_2, \theta_3) \left(1 + e^{-\frac{x-\theta_0}{\theta_1}}\right)^{\theta_2 + \theta_3}}$	$x \in (-\infty, \infty)$	$(\exp(-1 * d * ((x-a)/b))) / (d * \text{beta}(c, d) * ((1 + \exp(-1 * ((x-a)/b)))^{c+d}))$

Примечания:

* θ_0 – параметр сдвига функции; θ_1 – параметр масштаба функции; θ_2 – параметр формы функции; θ_3 – 2-й параметр формы функции.

** a – параметр сдвига функции; b – параметр масштаба функции; c – параметр формы функции; d – 2-й параметр формы функции.

Оценка максимального правдоподобия неизвестного параметра по группированным наблюдениям – это такое значение параметра, при котором функция правдоподобия

$$L(\theta) = \gamma \prod_{i=1}^k P_i^{n_i}(\theta), \quad (5)$$

где γ – некоторая константа и $P_i(\theta) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x, \theta) dx$ – вероятность попадания на наблюдения в i -й интервал значений, достигает максимума на множестве возможных значений параметра. Здесь предполагается, что для всех $\theta \in \Omega$ $P_i(\theta) > 0, i = \overline{1, k}$. Для вычисления оценки максимального правдоподобия дифференцируют функцию правдоподобия по θ и, приравнявая производные нулю, получают систему уравнений правдоподобия

$$\sum_{(l)} n_i \frac{\partial \ln P_i(\theta)}{\partial \theta_l} = 0, \quad l = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где m – размерность вектора параметров $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$.

ОМП неизвестного параметра по частично группированным наблюдениям называется такое значение параметра, при котором функция правдоподобия

$$L(\theta) \gamma \prod_{(1)} P_i^{n_i}(\theta) \prod_{(2)} \prod_{j=1}^{n_i} f(x_{ij}, \theta), \quad (7)$$

система уравнений правдоподобия

$$\sum_{(1)} n_i \frac{\partial \ln P_i(\theta)}{\partial \theta_l} + \sum_{(2)} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{\partial \ln f(x_{ij}, \theta)}{\partial \theta_l} = 0, \quad l = \overline{1, m}, \quad (8)$$

где $f(x, \theta)$ – функция плотности случайной величины. Это означает, что суммирование и умножение осуществляются по интервалам с группированными и негруппированными данными соответственно.

Проверка гипотез

После определения параметров выбранных распределений для каждого распределения проверяется по выбранным критериям гипотеза о согласии выборочного и теоретического распределения.

При проверке гипотез желательно пользоваться наиболее мощными критериями, а лучше равномерно наиболее мощными критериями – являющимися

наиболее мощными на всем множестве альтернативных гипотез. Однако в критериях согласия альтернативная гипотеза обычно не выделяется, кроме того, совсем не очевидно, какой критерий согласия окажется наиболее мощным для конкретной ситуации.

Большинство исследователей при решении задачи выбора распределения, наиболее хорошо описывающего их результаты, обычно пользуются одним из критериев согласия, опираясь на заданный уровень значимости (обычно 0,01, 0,05, 0,1), принимая гипотезу о согласии, если значение соответствующей статистики не превышает критического значения. При этом не учитывается, что различные критерии используют различные меры близости распределений, и принятие гипотезы о согласии по одному критерию совсем не означает, что распределения окажутся близкими в соответствии с другими критериями.

Так, критерии Колмогорова и Смирнова измеряют расстояние между теоретическим (гипотетическим) и эмпирическим интегральными законами распределения в равномерной метрике, в критериях ω^2 и Ω^2 это расстояние измеряется в квадратичной метрике. В критерии χ^2 Пирсона в квадратичной метрике измеряется расстояние между теоретическим и эмпирическим дифференциальными законами распределения. Близкая мера используется в критерии отношения правдоподобия.

Опыт показывает [11, 12], что в обязательном порядке необходимо использование ряда критериев, основанных на различных мерах близости. Это позволяет принимать решение по их совокупности.

Статистики Колмогорова и Смирнова определяются выражениями

$$S_k = \frac{(6ND_N + 1)^2}{18N}; \quad S_m = \frac{(6ND_N^+ + 1)^2}{9N}, \quad (9)$$

где

$$D_N = \max(D_N^+, D_N^-); \quad D_N^+ = \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ \frac{i}{N} - F(x_i) \right\}; \quad D_N^- = \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ F(x_i) - \frac{i-1}{N} \right\}; \quad (10)$$

N – объем выборки; x_1, x_2, \dots, x_N – упорядоченные по возрастанию выборочные значения; $F(x)$ – функция распределения, согласие с которой проверяется.

Статистики ω^2 и Ω^2 Мизеса имеют соответственно вид

$$S_\omega = N\omega_N^2 = \frac{1}{12N} + \sum_{i=1}^N \left\{ F(x_i) - \frac{2i-1}{2N} \right\}^2 \quad (11)$$

и

$$S_\Omega = N\Omega_N^2 = -N - 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{2i-1}{2N} \ln F(x_i) + \left(1 - \frac{2i-1}{2N} \right) \ln(1 - F(x_i)) \right\}^2. \quad (12)$$

Если проверку гипотез о согласии осуществлять по ряду критериев, то из-за различия используемых мер, выводы по различным критериям при близких альтернативах довольно часто указывают на предпочтительность различных законов. Поэтому задача идентификации закона распределения, наиболее хорошо описывающего наблюдаемую выборку, формулируется как многокритериальная задача принятия решения по простому компромиссному критерию (все критерии измеряются в единой шкале) вида

$$\max_{j \in R} \sum_{i=1}^m \omega_i P\{S_i > S_{ij}^{\bullet}\}, \quad (13)$$

где ω_i – весовой коэффициент i -го критерия; $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$; R – множество законов распределений, согласие с которыми проверяется; S_{ij}^{\bullet} – значение статистики i -го критерия при проверке гипотезы о согласии с j -м распределением.

Программное обеспечение для идентификации вероятностных распределений

Для идентификации вероятностных распределений значений почвенных свойств и расчета информационных характеристик, таких как информационная энтропия и дивергенция, нами было использовано свободное программное обеспечение – ППП ISW (<http://www.ami.nstu.ru/~headrd/>) и R (<https://www.r-project.org/>). Программа ISW (Статистический анализ интервальных наблюдений одномерных непрерывных случайных величин) служит цели идентификации наиболее близкого вероятностного распределения, соответствующего имеющимся дискретным данным.

Для ввода данных в ППП ISW необходимо ввести исследуемые данные в файл формата .txt. Первая строка в файле соответствует названию выборки. Числа во второй строке определяют: первое – тип выборки (0 – негруппированная; 1 – частично группированная; 3 – группированная); второе – число интервалов (для группированной и частично группированной выборок) и/или число индивидуальных наблюдений (для негруппированной и частично группированной выборок). Если выборка группированная и частично группированная, со следующей строки записываются количество наблюдений, попавших в интервалы группирования. В последующей строке вносятся граничные точки интервалов $x_i: i = \overline{1, (k-1)}$, где k – количество интервалов группирования (в перечень граничных точек должны входить только значения, разделяющие интервалы: левая x_0 и правая x_k границы области определения случайной величины во входном файле не задаются). Далее, в заключительной строке указывается негруппированная часть выборки (индивидуальные значения измерений). Деся-

тичный разделитель – точка, в случае негруппированной выборки осуществляется запись отсортированных по возрастанию значений.

Для частично группированной выборки файл будет выглядеть следующим образом [11]:

частично группированная выборка: эксперимент 3

```

1 5 50
751 2247 3998 2254 744
0.209 0.4470 0.5530 0.791
0.01 0.01 0.01 0.01 0.04 0.17 0.18 0.22
0.22 0.25 0.25 0.29 0.42 0.46 0.47 0.56
0.59 0.67 0.68 0.70 0.72 0.76 0.78 0.83
0.85 0.87 0.93 0.99 0.01 0.01 0.02 0.03
0.05 0.33 0.34 0.37 0.47 0.50 0.52 0.54
0.59 0.71 0.90 0.10 0.35 0.46 0.50 0.73
0.07 0.03
    
```

После введения данных следует сохранить изменения и изменить формат файла с .txt на .dat, после этого возможна загрузка данных выборки в ППП ISW. Запустив ППП ISW, следует перейти к анализу распределения: Действия → Статистический анализ (рис. 1), откроется окно «Оценивание параметров и проверка согласия» (рис. 2).

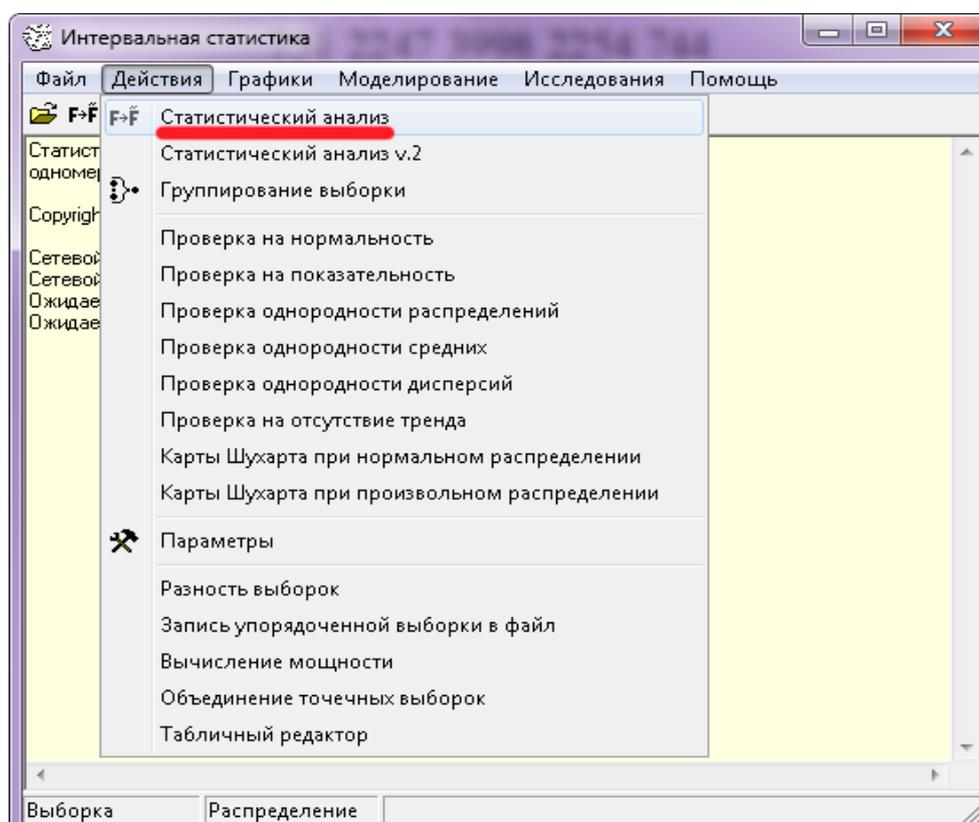


Рис. 1. Окно меню выбора действий программы ISW

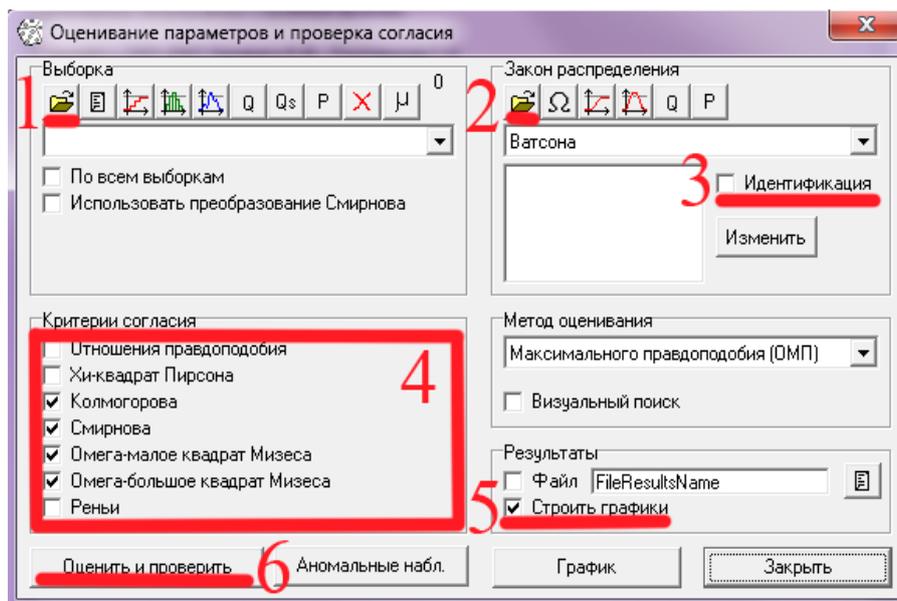


Рис. 2. Окно меню выбора статистических критериев согласия

Для открытия файла необходимо нажать кнопку «Открыть выборку» в правом верхнем углу окна (раздел: Выборка) (1) и указать созданный ранее файл для открытия. После успешной загрузки файла следует выбрать список законов распределения с которыми будет проверяться согласие выборки, для этого следует нажать кнопку «Открыть список распределений» (2) в блоке «Закон распределения». Для наших целей вполне подошел стандартный список. Затем в этом же блоке следует поставить галочку напротив слова «Идентификация» (3), после чего в открывшемся окне «Список распределений» (рис. 3) можно выбрать распределения с которыми будет проверяться согласие.

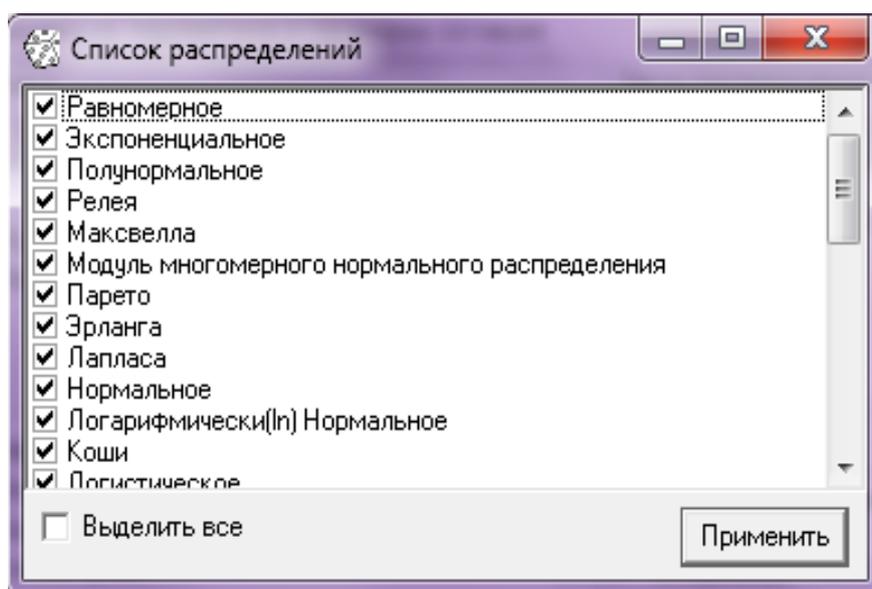


Рис. 3. Окно меню установки набора вероятностных распределений

На начальном этапе анализа можно оставить все распределения и затем исключать те распределения, на которых происходит остановка анализа или ошибка. Для наших данных наиболее часто проблемы при расчетах встречались с распределениями: Накагами; Гамма; Бета 1-го, 2-го и 3-го родов; Sb-Джонсона; Sl-Джонсона. В разделе «Критерии согласия» галочками можно выбрать критерии оценки соответствия выборки закону распределения (4). Затем следует убрать галочку «Строить графики» (5) в блоке «Результаты», после чего можно запустить анализ кнопкой «Оценить и проверить» (6). В основном окне программы будут выведены результаты анализа, в которых приведен список проверок каждого из выбранных распределений по указанным критериям согласия. Приведены название и параметры распределения, для которого проводилась проверка, статистики выбранных критериев, средний уровень значимости, и данное на его основе заключение о принятии гипотезы согласия, ниже приведены значения уровня значимости для каждого критерия. После списка всех выбранных распределений приведено распределение, имеющее наивысший уровень значимости, и место сохранения файла результатов. Следует отметить, что в файле не сохраняется средний уровень значимости и заключение о принятии гипотезы. Если вам необходимы эти данные, то можно сохранить информацию из окна программы вручную (выделить нужный фрагмент и скопировать в буфер обмена Ctrl+Insrt, с последующей вставкой в любом текстовом редакторе).

В большинстве случаев после анализа можно использовать определенное программой наилучшее распределение, в случае если оно достигает требуемого уровня согласия. Однако следует иметь в виду, что для некоторых распределений (например, группы распределений Джонсона, двойного экспоненциального и ряда других) критерий Смирнова не рассчитывается и принимается за ноль, что снижает средний уровень значимости для данного распределения, так же для некоторых выборок при расчете значимости у некоторых распределений критерий Смирнова может принимать значение $p = 1$, в том числе при значениях других критериев $p = 0$, что некорректно завышает уровень согласия или ошибочно не отвергает гипотезу, это делает целесообразным исключение данного критерия из анализа некоторых выборок.

После идентификации наиболее соответствующего выборке распределения, мы можем использовать его для расчета информационных характеристик и построения графиков.

Программное обеспечение для расчетов информационных характеристик

После нахождения наиболее соответствующего исходным дискретным данным непрерывного вероятностного распределения в среде R производится расчет информационных характеристик (информационной энтропии и дивергенции) для полученных распределений, а так же их визуализация.

В дальнейшем используется среда R. Для работы с распределениями полезны дополнительные пакеты функций «VGAM», «ExtDist» и «extraDistr». Для их установки в R следует указать CRAN mirror: Packages → Set CRAN mirror..., в открывшемся списке указать ближайшее местоположение (рис. 4). Затем можно установить пакеты: Packages → Install package(s)..., в открывшемся списке указав VGAM, а затем аналогично ExtDist и extraDistr. Или командой

```
install.packages("VGAM", "ExtDist", "extraDistr", "SuppDists",
dependencies=TRUE, type="source")
install.packages("extraDistr", dependencies=TRUE,
type="source")
```

Или же распаковкой архивов с пакетами в директорию:

```
C:/Users/User/Documents/R/win-library/3.1,
```

которую так же можно определить (если она отлична), введя команду library().

Архивы можно найти по адресу: https://cran.r-project.org/web/packages/available_packages_by_name.html.

Данная команда также поможет определить успешность установки пакетов. Впрочем, условие установки пакетов является необязательным, так как отсутствующие функции можно вводить иным способом. Для удобства были указаны оба варианта (см. приведенную выше таблицу).

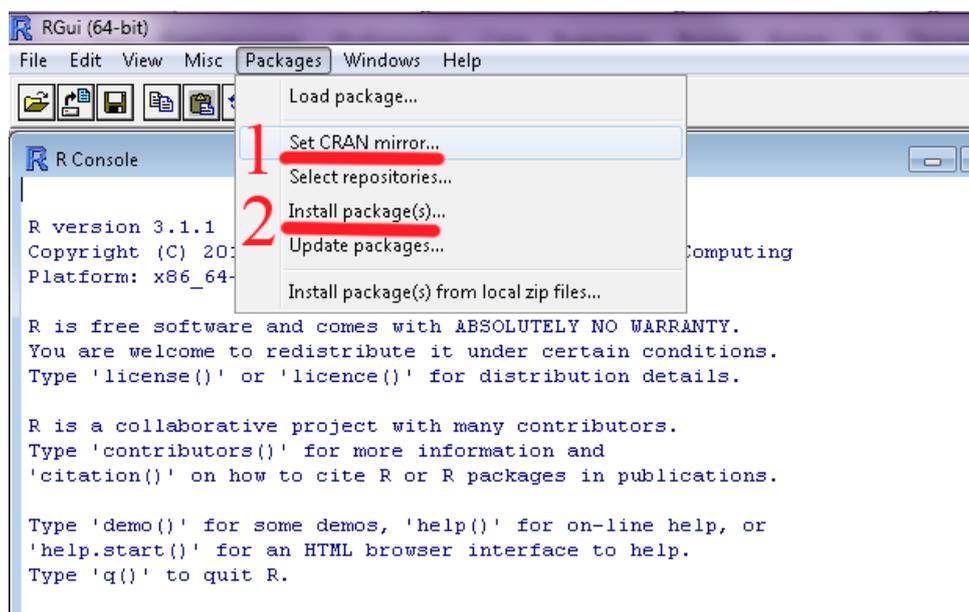


Рис. 4. Окно меню установки пакетов системы R

Мы опустим основные моменты работы в R оставив лишь некоторые пояснения, необходимые для осуществления анализа, более подробно с командами

и принципами работы R можно познакомиться в официальном справочном руководстве или пособиях [13, 14].

Все команды записываются в окне скрипта, открываемого File → New script (Ctrl+N) и выполняемого Edit → Run all для всего скрипта в окне, или Edit → Run line or selection (Ctrl+ R) для выделенных фрагментов или активной строки. Также возможно построчное введение команд в R Console.

Для начала работы необходимо загрузить дополнительные пакеты, если они используются, командой:

```
library("VGAM", "ExtDist", "extraDistr", "SuppDists")
```

После чего можно использовать команды для работы с функциями распределения. При этом команды имеют вид: функция (x , сдвиг, масштаб), где функция – команда вызова соответствующей функции; x – независимая переменная; сдвиг – параметр сдвига функции; масштаб – параметр масштаба функции.

Например:

```
dnorm(x, 20.38, 3.50)
```

для функции нормального распределения с параметрами сдвига 20.38 и масштаба 3.50.

Часть функций отсутствующих в базовой версии R и указанных дополнительных пакетах, либо отличающихся от функций, использованных в пакете ISW были записаны программным кодом R. Команды для используемых нами функций были представлены в таблице.

Для расчета информационной энтропии была использована формула [15]:

$$s = -\int f(x) \ln f(x) dx$$

Расчет информационной энтропии возможно осуществить в «R», используя команды:

```
integrand=function(x) { FUNCT*log(FUNCT, base=exp(1)) }  
integrate(integrand, lower=, upper=),
```

где FUNCT – функция распределения, lower=, upper= – верхний и нижний пределы интегрирования, которые берутся примерно совпадающими с минимальным и максимальными значениями в исследуемой выборке в случае, когда область определения исследуемой функции шире этих пределов. Если интервал варьирования значений выборки шире области определения функции, за пределы интегрирования берется пересечение интервала варьирования выборки и области определения функции.

Например:

```

inte-
grand=function(x){dnorm(x,20.3863,3.5029)*log(dnorm(x,20.3863,3.50
29),base=exp(1))}
integrate(integrand, lower=5,upper=36)

```

– информационная энтропия для функции нормального распределения с параметром сдвига 20.3863 и параметром масштаба 3.5029, пределы интегрирования с 5 до 36.

Для расчета информационной дивергенции использована формула

$$d = \int (W1(x) - W2(x)) \ln \left(\frac{W1(x)}{W2(x)} \right) dx,$$

где $W1(x)$ и $W2(x)$ – сравниваемые функции вероятностных распределений [16].

Расчет дивергенции можно осуществить в R, используя команды

```

integrand=function(x){(FUNCT1-FUNCT2)*log((FUNCT1/
FUNCT2),base=exp(1))}
integrate(integrand, lower=,upper=),

```

где FUNCT1 – первая сравниваемая функция распределения, FUNCT2 – вторая сравниваемая функция распределения, lower=, upper= – верхний и нижний пределы интегрирования, которые брались примерно совпадающими с минимальным и максимальными значениями в исследуемой выборке.

Например:

```

integrand=function(x){(dlogis(x,15.4186,2.997)-
dlaplace(x,12.7959,3.7839))*log((dlogis(x,15.4186,2.997)/dlaplace
(x,12.7959,3.7839)),base=exp(1))}
integrate(integrand, lower=0,upper=50)

```

– дивергенция между логистическим распределением со смещением 15.4186 и масштабом 2.997 и распределением Лапласа со смещением 12.7959 и масштабом 3.7839 в интервале значений от 0 до 50.

Таким образом, код программы для расчета энтропии логистического распределения с параметрами 15.4186 и 2.997 и распределения Лапласа с параметрами 12.7959 и 3.7839, а так же дивергенции между ними, будет выглядеть в R как:

```

library(VGAM)

#энтропия_logis(15.4186,2.997)
inte-
grand=function(x){dlogis(x,15.4186,2.997)*log(dlogis(x,15.4186,2.9
97),base=exp(1))}

```

```

integrate(integrand, lower=0, upper=50)
#энтропия_laplace(12.7959, 3.7839)
inte-
grand=function(x) {dlaplace(x, 12.7959, 3.7839) * log(dlaplace(x, 12.795
9, 3.7839), base=exp(1))}
integrate(integrand, lower=0, upper=50)

#дивергенция_logis(15.4186, 2.997) & laplace(12.7959, 3.7839)
integrand=function(x) { (dlogis(x, 15.4186, 2.997) -
dlaplace(x, 12.7959, 3.7839)) * log((dlogis(x, 15.4186, 2.997) / dlaplace(
x, 12.7959, 3.7839)), base=exp(1))}
integrate(integrand, lower=0, upper=50)

```

В среде R также возможно визуализировать полученные распределения (рис. 5). Например:

```

library(VGAM)
y=dcauchy(x, 0.1264, 0.0866)
plot(x, y, type='l', col='black', xlab="Содержание гумуса,
%", ylab="Плотность вероятности", xlim=range(0, 5),
ylim=range(0, 3.5))
b1=0.4171
a1=1.2153
curve((1/b1)*exp(1)^((-1*(x-a1))/b1-exp(1)^(-1*((x-
a1))/b1)), col="blue", add=T)
b=0.3161
a=0.6291
curve((1/b)*exp(1)^((-1*(x-a))/b-exp(1)^(-1*((x-
a))/b)), col="violet", add=T)
curve(dlogis(x, 2.38, 0.31), col="red", add=T)
legend("topright",
c(expression('0-20'), expression('20-30'), expression('30-
50'), expression('50-100')),
col=c('red', 'blue', "violet", 'black'), lty=1)
title(main=expression("Содержание гумуса, %")),

```

где `plot` – функция построения двумерных графиков;

`type` – символьный аргумент, определяющий тип построения графика: "p" – точки, "l" – линии, "b" – линии и точки, "c" – строятся только линии из "b", "o" – точки и линии пересекаются, "h" – гистограммо-подобные вертикальные линии, "s" – ступенчатая линия, "n" – нечего не строится;

`col` – аргумент задающий цвет;

`xlab`, `ylab` – символьные аргументы, задающие названия осей;

`xlim`, `ylim` – векторы, задающие пределы осей;

`lty` – аргумент, определяющий стиль линии: 1 – сплошная; 2 – штриховая; 3 – пунктирная; 4 – штрих-пунктир; 5 – длинный штрих; 6 – двойной штрих; 0 – отсутствует линия;

`curve` – функция построения кривой;

`legend` – создание легенды;

`title` – создание заголовка.

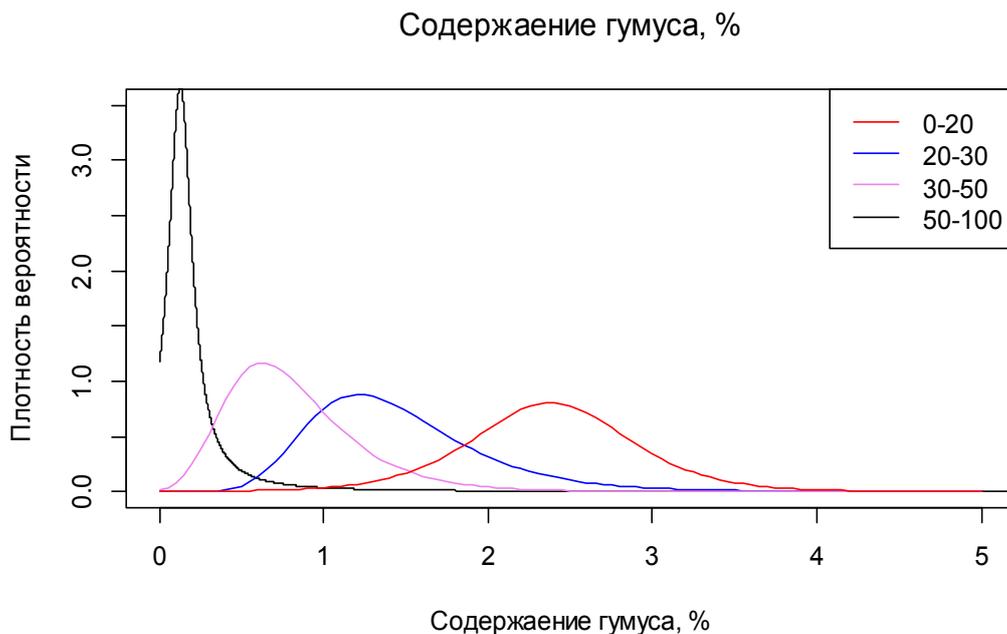


Рис. 5. Вероятностно-статистические распределения содержания гумуса

Заключение

Почвы, как и большинство пространственно распространенных объектов, обладают континуальностью свойств, при этом их количественная выраженность характеризуется значительной вариабельностью, имеющей как стохастическую, так и закономерную природу. Под влиянием антропогенной деятельности и происходящих климатических и природных изменений, характеристики почв изменяются не только в пространстве, но и во времени. При этом происходит изменение вероятностной структуры выраженности свойств, которая находит отражение в изменении вероятностно-статистических распределений. Для строгой аналитической оценки таких изменений в статье предлагаются новые математические и программные подходы, позволяющие изучать вероятностно-статистические и информационные закономерности состояния и изменений изучаемых объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геопространственный дискурс опережающего и прорывного мышления / А. П. Карпик, Д. В. Лисицкий, К. С. Байков, А. Г. Осипов, В. Н. Савиных // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 53–67.
2. Pedometrics, Progress in Soil Science / eds. A.V. McBratney, B. Minasny, Uta Stockmann. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – 720 p. DOI 10.1007/978-3-319-63439-5_1.
3. Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных карт землепользования. – М. : Колос, 1973.
4. Козловский Ф. И. Теория и методы изучения почвенного покрова. – М. : ГЕОС, 2003. – 536 с.

5. Михеева И. В. Вероятностно-статистическая и информационная оценка современных процессов в природных объектах на основе данных почвенного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Том 22, № 4. – С. 220–237.
6. Михеева И. В. Вероятностно-статистические модели свойств почвы (на примере каштановых почв Кулундинской степи). – Новосибирск : Наука, Сибирское предприятие РАН, 2001. – 200 с.
7. Михеева И. В. Мониторинг и вероятностно-статистическая оценка устойчивости и изменчивости природных объектов при современных процессах (на примере каштановых почв Кулундинской степи). – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – 103 с.
8. Михеева И. В. Статистическая энтропия как критерий оценки эволюции и динамики почвенного покрова // Сибирский экологический журнал. – 2004. – № 3. – С. 445–454.
9. Mikheeva I. V. Divergence of Probability Distribution of the Soil Properties as a Quantitative Characteristic of the Soil Cover Transformation // Contemporary Problems of Ecology. – 2009. – 2(6). – P. 667–670.
10. Malone B. P., Minasny B., McBratney A. B. Using R for Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science. – Switzerland : Springer International Publishing, 2017. – 262 p. DOI 10.1007/978-3-319-44327-0_4.
11. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ одномерных наблюдений случайных величин: Программная система. – Новосибирск : НГТУ, 1995. – 125 с.
12. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ группированных, частично группированных и негруппированных наблюдений одномерных непрерывных случайных величин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск : НГТУ, 1997. – 46 с.
13. Зарядов И. С. Введение в статистический пакет R: типы переменных, структуры данных, чтение и запись информации, графика. – М. : Российский ун-т дружбы народов, 2010. – 207 с.
14. Зарядов И. С. Статистический пакет R: теория вероятностей и математическая статистика. – М. : Российского ун-т дружбы народов, 2010. – 141 с.
15. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. – М. : Наука, 1987. – 304 с.
16. Губарев В. В. Вероятностные модели : справочник в 2-х частях. – Новосибирск : НЭТИ, 1992.

Получено 05.07.2018

© И. В. Михеева, А. А. Оплеухин, 2018

IDENTIFICATION OF PROBABILISTIC AND STATISTICAL MODELS OF PROPERTIES OF ECOLOGICAL SYSTEMS AND THEIR INFORMATION ASSESSMENT

Irina V. Mikheeva

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (383)363-90-13, e-mail: mikheeva@issa.nsc.ru

Alexey A. Opleukhin

Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 8/2, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Junior Researcher, phone: (383)363-90-13, e-mail: plymbym@rambler.ru

In case of condition monitoring of natural objects and ecological systems under the influence of climatic changes and anthropogenic influences it is necessary to carry out the analysis and comparison in different time points of variability of continual object properties in space, which is especially important for soil assessment. The previous researches showed that the structure of variability of soils properties under the influence of natural and anthropogenic processes is rebuilt that leads to change of functions of their probable distributions. The analysis of property variability of a natural object can be realized by identification of its probable and statistical model which is characterized by a certain type and parameters of mathematical function of probable distribution, or the probable-statistical distribution (PSD). PSD is the most exact and complete statistical standard of object property under study. For scalar integral assessment of variability and its changes we offered to use the information characteristics calculated on the basis of PSD. For the information characteristic of a measure of uncertainty of values of object properties we used information entropy, and for assessment of distinctions – information divergence. The article shows the possibility of free software use for statistical analysis of attributive data of these geosystems on the example of soils. It also considers stages of statistical analysis and program features of PSD identification and also calculations of their information characteristics when using the free software. The article provides the list of the most often defined probable distributions of soil properties and their representation in the software environment of "R". Examples of calculations on the basis of soils monitoring actual data in the South of Western Siberia are reviewed.

Key words: monitoring, properties of soils, databases, probable and statistical models, statistical standard, information characteristics, free software.

REFERENCES

1. Karpik, A. P., Lisickij, D. V., Bajkov, K. S., Osipov, A. G., & Savinyh, V. N. (2017). Geospacial discourse of forward-looking and breaking-through way of thinking. *Vestnik SGUGiT*. [*Vestnik SSUGT*], 22(4), 53–67 [in Russian].
2. *Pedometrics, Progress in Soil Science*. (2018). A. B. McBratney, B. Minasny, & Uta Stockmann (Eds.). Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 720 p. doi: 10.1007/978-3-319-63439-5_1.
3. *Obshcheyuznaya instrukciya po pochvennym obsledovaniyam i sostavleniyu krupnomasshtabnyh kart zemlepol'zovaniya* [*All-Union guidelines for soil survey and compilation of large-scale maps of land tenure*]. (1973). Moscow: Kolos Publ. [in Russian].
4. Kozlovskij, F. I. (2003). *Teoriya i metody izucheniya pochvennogo pokrova* [*Theory and methods of soil cover*]. Moscow: GEOS Publ., 536 p. [in Russian].
5. Mikheeva, I. V. (2017). Probabilistic–statistical and information assessment of contemporary processes in natural objects on the basis of data of soil monitoring. *Vestnik SGUGiT* [*Vestnik SSUGT*], 22(4), 220–237 [in Russian].
6. Mikheeva, I. V. (2001). *Probability and statistical models of soils (at example of chestnut soils of Kulunda steppe)*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian enterprise of RAS, 200 p. [in Russian].
7. Mikheeva, I. V. (2005). *Monitoring and probabilistic and statistical evaluation of stability and variability of natural objects under contemporary processes (at example of chestnut soils of Kulunda steppe)*. Novosibirsk: SB RAS Publ., 103 p. [in Russian].
8. Mikheeva, I. V. (2004). Statistical entropy as a criterion for estimation evolution and dynamics of topsoil. *Sibirskij jekologicheskij zhurnal* [*Contemporary Problems of Ecology*], 3, 445–454 [in Russian].
9. Mikheeva, I. V. (2009). Divergence of probability distribution of the soil properties as a quantitative characteristic of the soil cover transformation. *Sibirskij jekologicheskij zhurnal* [*Contemporary Problems of Ecology*], 2(6), 667–670.

10. Malone, B. P., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). *Using R for Digital Soil Mapping, Progress in Soil Science*. Springer International Publishing Switzerland. doi: 10.1007/978-3-319-44327-0_4.
11. Lemeshko, B. Ju. (1995). *Statisticheskij analiz odnomernykh nablyudeniy sluchaynykh velichin [Statistical analysis of one-dimensional observations of random variables]*. Novosibirsk: NSTU Publ., 125 p. [in Russian].
12. Lemeshko B. Yu. (1997). Statistical analysis of grouped, partially grouped and non-grouped observations of one-dimensional continuous random variables. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Novosibirsk: NSTU Publ., 46 p. [in Russian].
13. Zaryadov, I. S. (2010). *Vvedenie v statisticheskij paket R: tipy peremennyh, struktury dannyh, chtenie i zapis' informacii, grafika*. Moscow: RUDN University Publ., 207 p. [in Russian].
14. Zaryadov, I. S. (2010). *Statisticheskij paket R: teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Statistical package R: probability theory and mathematical statistics]*. Moscow: RUDN University Publ., 141 p. [in Russian].
15. Kolmogorov A. N. (1987). *Teoriya informacii i teoriya algoritmov [Information Theory and Theory of Algorithms]*. Moscow: Nauka Publ., 304 p. [in Russian].
16. Gubarev, V. V. (1992). *Veroyatnostnye modeli [Probabilistic models]*. Novosibirsk: Novosibirsk Electrotechnical Institute Publ. [in Russian].

Received 05.07.2018

© I. V. Mikheeva, A. A. Opleukhin, 2018

УДК 630*9

НАХОЖДЕНИЕ МАРШРУТА МИНИМАЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПУТИ ПРИ ДОСТАВКЕ ДРЕВЕСИНЫ С ЛЕСОСЕКИ

Александр Петрович Мохирев

Лесосибирский филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева», 662543, Россия, г. Лесосибирск, ул. Победы, 29, кандидат технических наук, доцент, тел. (39145)6-28-03, e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru

Марина Михайловна Герасимова

Лесосибирский филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева», 662543, Россия, г. Лесосибирск, ул. Победы, 29, кандидат технических наук, доцент, тел. (39145)6-28-03, marina-gerasimov@list.ru

Сергей Олегович Медведев

Лесосибирский филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева», 662543, Россия, г. Лесосибирск, ул. Победы, 29, кандидат экономических наук, доцент, тел. (39145)6-28-03, medvedev_serega@mail.ru

Представленный в статье алгоритм решения задачи заключается в нахождении оптимальных маршрутов и объемов перевозки груза по этим маршрутам, при которых стоимость доставки заданного объема груза из начального пункта в конечный минимальна. Алгоритм основывается на алгоритме Дейкстры (поиска кратчайшего пути в графе) и методе динамического программирования. Алгоритм представлен для решения задачи нахождения оптимального маршрута вывозки древесины из лесосеки. Особенностью лесных дорог являются различные транспортные затраты и пропускные особенности на участках сети лесных дорог. Данные показатели зависят от природно-климатических условий участка маршрута. В стоимость дуги входят как затраты, зависящие от объема перевозимого груза (транспортировка), так и не зависящие (строительство и восстановление дорог). Особенностью задачи является то, что затраты на восстановление (строительство), вывозку по включаемому в маршрут участку могут изменяться в зависимости от объема груза, перевозимого по нему.

Ключевые слова: алгоритм решения задачи, маршрут минимальной стоимости, транспортировка древесины, оптимальный маршрут, транспортные затраты.

Введение

Одной из главных задач эффективного природопользования является создание транспортной инфраструктуры. В настоящее время на территории лесоэксплуатационных участков лесного фонда за долгие годы его освоения создано большое количество дорог. Часто решение по выбору транспортного пути происходит необоснованно либо с учетом какого-либо одного фактора. Для данной задачи необходим обоснованный алгоритм. При этом отдельное внимание должно уделяться текущему состоянию лесных дорог, находящихся в достаточно изношенном состоянии.

Разработано много алгоритмов решения задач нахождения оптимальных маршрутов [1–3]. Одни из них направлены на определение кратчайшего пути [4],

другие – на преодоление маршрута за минимальное время [5, 6]. Однако на сегодняшний день наиболее актуальной является задача нахождения минимальной стоимости маршрута [7]. Исходными данными при этом являются стоимости транспортировки на единицу длины или на дугу между вершинами графов.

Для решения задач транспортировки древесины с лесосеки потребителю также разработан ряд алгоритмов [8–10]. Однако представленные алгоритмы не учитывают все транспортные затраты, влияющие на выбор оптимального маршрута. В большинстве случаев задача решается с учетом только затрат на доставку древесины. Реже учитываются затраты не зависящие от объема вывозки древесины (строительство и восстановление дорог и т. п.). По нашему мнению, это один из ключевых факторов затрат предприятий и, следовательно, его исключение из анализа и разрабатываемых алгоритмов некорректно. При этом в условиях изношенности и критического состояния лесных дорог эти затраты могут быть огромными, а их перенесение на стоимость продукции – нереальным.

Транспортная сеть при транспортировке заготовленной древесины с лесосеки представляется в виде графа. При этом транспортные затраты могут как зависеть от объема перевозимых грузов транспортировки, так и не зависеть. К независящим от объема перевозимого груза затратам можно отнести строительство (восстановление) и содержание транспортных путей. Величина транспортных расходов по дуге зависит от природно-климатических условий. Наиболее значимыми природно-климатическими условиями являются тип дороги, величина уклона дороги, тип грунтов, наличие водных преград [11].

Особенностью транспортировки лесного груза является ограниченная пропускная способность участков транспортных путей [12]. Данная характеристика будет зависеть от выше представленных природно-климатических условий.

Данная задача адаптируется в ГИС планирования лесозаготовительного производства [13–16].

Постановка задачи

Необходимо доставить заготовленный объем древесины с лесного участка до пункта доставки с минимальными затратами. Между лесным участком и пунктом доставки есть некоторое количество промежуточных пунктов, которые соединены с ними и между собой сетью дорог, имеющих разную пропускную способность. Кроме того, между некоторыми из них дороги могут быть построены. На стоимость вывозки, восстановления и строительства дорог будут влиять природно-климатические условия, наиболее значимыми из которых выступают рельеф местности, вид грунтов и их несущая способность, наличие водных преград, температурные режимы, количество осадков и величина снежного покрова. Заготовленный объем древесины можно перевезти из начального пункта в конечный разными маршрутами. Необходимо найти оптимальное распределение объема перевозок древесины по различным маршрутам таким обра-

зом, чтобы вывезти весь объем древесины с лесного участка и доставить его в пункт доставки с минимальными затратами на вывозку, восстановление и строительство дорог. Особенностью задачи является то, что затраты на восстановление (строительство), вывозку по включаемому в маршрут участку могут изменяться в зависимости от объема груза, перевозимого по нему.

Исходные данные

Обозначим v_0 – начальный пункт (лесной участок); v_n – конечный пункт (пункт доставки); v_1, \dots, v_{n-1} – промежуточные пункты.

1. Объем древесины в начальном пункте, который необходимо вывезти, – Q .

2. Пропускная способность дороги между пунктами v_i и v_j – u_{ij} (максимальное количество груза, которое можно по ней перевезти).

3. Затраты на вывозку 1 м^3 груза по дороге между пунктами v_i и v_j – c_{vij} , затраты на ее строительство (восстановление) – c_{npj} .

Сбор исходных данных возможно производить в автоматизированном режиме с использованием географических информационных систем, материалов дистанционного зондирования [17–24].

Решение

Представим начальный, конечный, промежуточные пункты и соединяющие их существующие и проектируемые дороги в виде связного ориентированного графа (сети) $G = (V, E)$, где V – множество вершин $v_i (i = 0, \dots, n)$; E – множество дуг (v_i, v_j) . Вершина v_0 соответствует начальному пункту, v_n – конечному.

Каждой дуге ставятся в соответствие три числа: пропускная способность, затраты на вывозку единицы груза и затраты на строительство (восстановление).

Составим математическую модель задачи.

Пусть x_{ijk} – объем перевозки груза по участку (v_i, v_j) по k -му маршруту.

Суммарные затраты на вывозку всего объема древесины, строительство (восстановление) дорог должны быть минимальными

$$F = \sum_{(v_i, v_j \in E)} \left(z_{ij} c_{npj} + c_{vij} \left(\sum_{k=1}^m x_{ijk} \right) \right) \rightarrow \min,$$

где c_{npj} – затраты на строительство (восстановление) участка (v_i, v_j) ;

c_{vij} – затраты на вывозку 1 м³ груза по дуге (v_i, v_j) ;

m – количество маршрутов, по которым будет осуществляться вывозка;

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если по дуге } (v_i, v_j) \text{ перевозится груз,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Весь объем древесины должен быть вывезен из начального пункта и доставлен в конечный

$$\sum_{k=1}^m \sum_{(v_0, v_j) \in E} x_{0jk} = \sum_{k=1}^m \sum_{(v_i, v_n) \in E} x_{ink} = Q.$$

Объем древесины, доставленный в промежуточный пункт x_i , должен быть из него вывезен

$$\sum_{k=1}^m \sum_{(v_i, v_j) \in E} x_{ijk} = \sum_{k=1}^m \sum_{(v_j, v_i) \in E} x_{jik}, \quad j = 1, \dots, n-1.$$

Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения задачи заключается в нахождении оптимальных маршрутов и объемов перевозки груза по этим маршрутам, при которых стоимость доставки заданного объема груза из начального пункта в конечный минимальна. Алгоритм основывается на алгоритме Дейкстры (поиска кратчайшего пути в графе) и методе динамического программирования [25].

1 этап. Выполняем проверку:

1. Если $\sum_{(v_0, v_j) \in E} u_{0j} < Q$, то задача не имеет решения.
2. Если $\sum_{(v_0, v_j) \in E} u_{0j} \geq Q$, то полагаем $k = 1$.

2 этап. Определяем k -й путь минимальной стоимости из вершины v_0 в вершину v_n и вывозимое по нему количество груза.

Шаг 1. Присваиваем начальные метки $[l(v_i); Q_i]$ вершинам графа: $l(v_i)$ – минимальная приведенная стоимость доставки груза из вершины v_0 в вершину v_i ; Q_i – объем груза в вершине v_i .

Метку вершины v_0 полагаем равной $[0; Q_0]$. При нахождении первого маршрута $Q_0 = Q$. Всем остальным вершинам присваиваем метки $[\infty; 0]$, их будем считать временными.

Шаг 2. Определяем минимальное значение $l(v_i)$ в метках вершин: $l(v_0) = 0$. Будем считать метку вершины v_0 постоянной.

Шаг 3. Изменяем метки вершин v_j , принадлежащих множеству $\tilde{A}(v_0)$ ($\tilde{A}(v_0)$ – множество вершин, к которым идут дуги из вершины v_0) следующим образом:

$$[l(v_j); Q_j; v_0],$$

где $l(v_j)$ – минимальная стоимость перевозки Q_j единиц груза в вершину v_j из вершины v_0

$$l(v_j) = \min \{l(v_j), l(v_0) + c_{0j}\};$$

Q_j – объем груза, который перевозится в вершину v_j из вершины v_0

$$Q_j = u_{0j};$$

c_{0j} – приведенные затраты на прокладку дороги и вывозку груза по участку (v_0, v_j) :

$$c_{0j} = \frac{c_{e0j} \cdot u_{0j} + c_{np0j}}{u_{0j}}.$$

Если пропускная способность дуги (v_0, v_j) равна 0, то метка вершины v_j не изменяется.

Полученные метки считаем временными.

Следует учесть, что при выполнении следующих шагов алгоритма всем вершинам, кроме начальной и конечной, могут быть присвоены несколько временных меток.

Шаг 4.

1. Если метки всех вершин, кроме v_n , постоянные, то метку этой вершины также считаем постоянной и переходим к шагу 6.

2. Если в какой-либо из временных меток $l(v_j)$ больше значения $l(v_n)$, то эту метку можно из рассмотрения исключить. Из вершин с временными метками выбирается вершина v_i^* , для которой $l(v_i^*) = \min \{l(v_i)\}$. Если таких вершин несколько, то выбирается любая из них.

Шаг 5. Выявляем вершины v_j , принадлежащие множеству $\tilde{A}(v_i^*)$, для которых $u_{i^*j} \neq 0$. Если множество $\tilde{A}(v_i^*)$ – пустое, то метка вершины v_i^* становится

постоянной. Если вершина v_j является третьим показателем в метке вершины v_i^* , то эту вершину можно исключить из множества $\tilde{A}(v_i^*)$, так как этот случай соответствует перевозке в ту вершину, из которой на предыдущем шаге был совершен переход, что, очевидно, является невыгодным с точки зрения затрат на перевозку.

Сравниваем пропускные способности дуг (v_i^*, v_j) и показатель Q_i^* в метке вершины v_i^* .

1. Если множеству $\tilde{A}(v_i^*)$ принадлежит только одна вершина v_j , то возможны случаи:

1.1. Если $u_{i j}^* < Q_i^*$, то рассчитывается новое значение веса дуги между вершиной v_0 и вершиной $v_i \in \tilde{A}(v_0)$, которую можно определить, последовательно перемещаясь в обратном направлении от вершины v_i^* к вершине v_0 по дугам, конец которых указан третьим показателем в метках:

$$c_{0i} = \frac{c_{\text{в}0i} \cdot u_{i j}^* + c_{\text{нр}0i}}{u_{i j}^*}.$$

Вычисляется новое значение $l(v_i)$

$$l(v_i) = l(v_0) + c_{0i}.$$

Метка вершины v_i заменяется новой меткой $[l(v_i); u_{i j}^*; v_0]$.

Аналогичные метки будут добавлены ко всем вершинам, определенным при перемещении от вершины v_i^* к вершине v_0 .

Возвращаемся на шаг 4.

1.2. Если $u_{i j}^* \geq Q_j$, тогда вычисляется вес дуги $c_{i j}^*$ и значение $l(v_j)$:

$$c_{i j}^* = \frac{c_{\text{в}i j}^* \cdot Q_i^* + c_{\text{нр}i j}^*}{Q_i^*},$$

$$l(v_j) = \min \left\{ l(v_j), l(v_i^*) + c_{i j}^* \right\},$$

вершине v_j присваивается метка

$$\left[l(v_j); Q_i^*; v_i^* \right].$$

Метка вершины v_i^* будет считаться постоянной.

Возвращаемся на шаг 4.

2. Если множеству $\tilde{A}(v_i^*)$ принадлежит несколько вершин $v_j (j=1, \dots, l)$, то возможны следующие случаи:

2.1. Для одной из вершин v_j $u_{i^*j}^* < Q_i^*$, этот случай аналогичен случаю 1.1 с той разницей, что для вершины v_i добавляется новая метка $\left[l(v_i); u_{i^*j}^*; v_0 \right]$. Возвращаемся на шаг 4. При этом, при сравнении $l(v_i)$ на шаге 4 необходимо учитывать все метки, как уже существующие, так и вновь добавленные, а затем при сравнении пропускных способностей дуг (v_i^*, v_j) с Q_i^* рассматривать только те вершины из множества $\tilde{A}(v_i^*)$, для которых $u_{i^*j}^* \geq Q_i^*$.

2.2. $u_{i^*j}^* < Q_i^*$ для всех вершин $v_j (j=1, \dots, l)$, то возможны два случая:

а) все $u_{i^*j}^*$ одинаковые, этот случай аналогичен случаю 1.1;

б) среди величин $u_{i^*j}^*$ есть различные, тогда для всех значений $u_{i^*j}^*$ по формуле (7) рассчитываются новые значения веса дуги между вершиной v_0 и вершиной $v_i \in \tilde{A}(v_0)$, которую можно определить, последовательно перемещаясь в обратном направлении от вершины v_i^* к вершине v_0 по дугам, конец которых указан третьим показателем в метках.

Вычисляются соответствующие каждому новому значению c_{oi} показатели $l(v_i)$.

Для вершины v_i добавляются новые метки, соответствующие различным значениям $u_{i^*j}^*$ и, как следствие, разным значениям $l(v_i)$.

Возвращаемся на шаг 4. При этом при сравнении $l(v_i)$ необходимо учитывать все метки, как уже существующие, так и вновь добавленные.

2.3. Для всех вершин $v_j (j=1, \dots, l)$ $u_{i^*j}^* \geq Q_i^*$, тогда эти вершины получают метку (11), где c_{i^*j} вычисляется по формуле (9), $l(v_j)$ – по формуле (10). Метка вершины v_i^* будет считаться постоянной.

Возвращаемся на шаг 4.

Шаг 6. Определяется маршрут, имеющий минимальную стоимость перевозки Q_n единиц груза от вершины v_0 до вершины v_n (минимальная приведенная стоимость – $l(v_n)$). Q_n – второй показатель в метке, присвоенной вершине v_n .

Для определения оптимального маршрута выполняется движение в обратном направлении: от вершины v_n к вершине v_0 : последней в маршруте будет вершина v_n , предшествующая ей вершина является третьим показателем в метке вершины v_n . Переходим к этой вершине, в метке которой указана предшествующая ей вершина, и т. д., пока не дойдем до вершины v_0 , которая будет первой в маршруте.

Таким образом, в результате будет определен оптимальный маршрут $v_0 \rightarrow v_{i_1} \rightarrow v_{i_2} \rightarrow v_{i_3} \rightarrow \dots \rightarrow v_{i_s n}$, где s – количество промежуточных вершин в маршруте между v_0 и v_n .

Этап 3. Определяются оптимальные значения переменных: $x_{0i_1 k}^* = x_{i_1 i_2 k}^* = x_{i_2 i_3 k}^* = \dots = x_{i_s n k}^* = Q_n$.

Этап 4. Изменяем величину Q_0 : $Q_0 := Q_0 - Q_n$.

Этап 5. Анализируем полученное значение Q_0 .

1. Если $Q_0 > 0$, то возможны два случая:

1.1. Если пропускные способности всех дуг (v_0, v_j) ($v_j \in \Gamma(v_0)$) равны 0 или $\sum_{(v_0, v_j \in E)} u_{0j} < Q_0$, то задача не имеет решения, из v_0 можно вывезти только Q_0 единиц груза.

1.2. В противном случае пропускные способности дуг $(v_0, v_{i_1}), (v_{i_1}, v_{i_2}), (v_{i_2}, v_{i_3}), \dots, (v_{i_s}, v_n)$, не равные 0, уменьшаются на величину Q_n , а их веса принимаются равными стоимости вывозки единицы груза. На следующей итерации для указанных дуг c_{npj} принимается равной 0.

Полагаем $k = k + 1$ и возвращаемся к этапу 2.

2. Если $Q_0 = 0$, то задача решена: найдены оптимальные маршруты и объемы перевозки груза из узла v_0 в узел v_n .

Вычисляем минимальные затраты на вывозку на вывозку объема древесины Q , строительство (восстановление) дорог по формуле (1).

Результаты и заключение

В результате расчета по выше представленному алгоритму определяется маршрут минимальной стоимости доставки древесины.

Алгоритм характеризуется следующими особенностями:

– учитываются как затраты зависящие от объема перевозимого груза, так и не зависящие;

– затраты на восстановление (строительство), вывозку по включаемому в маршрут участку могут изменяться в зависимости от объема груза, перевозимого по нему;

- учитывается пропускная способность участков маршрута;
- учитываются наиболее влияющие на стоимость транспортировки природно-климатические условия участков маршрута.

Представленный алгоритм является оригинальным, решающим одну из производственных задач эффективного природопользования. При решении поставленной задачи снижаются затраты на транспортировку древесины. Учитываются затраты, как зависящие от объема, так и не зависящие, что является особенностью.

В дальнейшем планируется адаптировать данную задачу к географической информационной системе, что снизит затраты на сбор и обработку исходных данных.

Представленный алгоритм возможно использовать в других областях при решении подобных задач маршрутизации.

В рамках исследования была выполнена апробация разработанного алгоритма. Для одного из крупных лесозаготовительных предприятий была произведена работа по определению маршрута с минимальной стоимостью. При оценке транспортировки древесины было установлено, что стоимость доставки согласно применяемой им схеме составляет 6,05 руб./м³·км. Применение расчетов согласно показанному выше алгоритму позволило определить оптимальный маршрут доставки. В теории стоимость доставки должна была составлять $5,8 \pm 0,5$ руб./м³·км. После представления руководству предприятия и модернизации существующей схемы доставки древесных ресурсов стоимость составила 5,825 руб./м³·км. Данный практический результат находится в границах ожидаемого. Также следует отметить, что в ходе работ над маршрутам предприятия были произведены работы по прокладыванию нового участка дороги длиной 15 км, часть дорог была подвергнута серьезной модернизации. Согласно расчетам, такая постановка вопроса позволила в конечном итоге снизить стоимость доставки на 0,1 руб./м³·км. Таким образом, достоверность и адекватность алгоритма подтверждается практической апробацией. Показанные рекомендации целесообразно использовать на предприятиях, осуществляющих транспортировку древесных ресурсов, особенно в условиях значительной изношенности лесных дорог.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-310-00311.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L. Introduction to Algorithms, C. Stein. – Third edition. – MIT Press, 2001. – 1312 p.
2. Pallottino S., Scutellà M. G. Shortest Path Algorithms in Transportation Models: Classical and Innovative Aspects // Equilibrium and Advanced Transportation Modelling / P. Marcotte and S. Nguyen, eds. – Kluwer, 1998. – P. 245–281.
3. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. – Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1993. – 846 с.

4. Heinimann H. R. Forest road network and transportation engineering - state and perspectives // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2017. – Т. 38. No. 2. – P. 155–173.
5. De vries F. W. T. P. The cost of maintenance processes in plant cells // *Annals of Botany*. – 1975. – Vol. 39, No. 1. – P. 77.
6. Palmgren M., Ronnqvist M., Varbrand P. A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound // *International Transactions in Operational Research (IFORS)*. – 2003. – Vol. 10, No. 5. – P. 433–447.
7. Kovács P. Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation // *EGRES Technical Report No. 4*. – 2013.
8. Борисов Г. А., Кукин В. Д., Кузина В. И. Методы поиска наивыгоднейшего варианта сети лесовозных дорог // *Лесной журнал* – 2001. – № 3. – С. 63–70.
9. Антонова Т. С., Тюрин Н. А. Планирование логистических потоков лесозаготовительного предприятия // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2017. – № 218. – С. 61–71.
10. Сушков А. С. Применение метода сетевого планирования для совершенствования транспортных потоков лесоматериалов // *Строительные и дорожные машины*. – 2015. – № 6. – С. 30–32.
11. Солопанов М. С., Карпушина В. Е., Сушков С. И. К вопросу разработки методики совершенствования транспортно-грузовых потоков на предприятиях лесного комплекса // *Воронежский научно-технический вестник*. – 2014. – Т. 3, № 4 (10). – С. 80–84.
12. Orlin J. B. Maximum-throughput dynamic network flows // *Mathematical Programming*. – North-Holland, 1983. – Vol. 27. – P. 214–231.
13. Мохирев А. П., Горяева Е. В., Егармин П. А. Создание геоинформационного ресурса для планирования лесозаготовительного производства // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 137–153.
14. Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk territory as a case study) / A. P. Mokhirev, M. O. Pozdnyakova, S. O. Medvedev, V. O. Mammатов // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2018. – No. 3 (16). – P. 313–319. – Doi: 10.5937/jaes16-16908.
15. Мохирев А. П., Егармин П. А. Географическая информационная система планирования оптимального освоения лесного фонда // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 4 (12). – С. 172–177.
16. Моделирование транспортно-технологического процесса доставки лесного сырья с применением системного подхода / Г. Л. Козин, И. М. Еналеева-Бандура, В. Г. Миргунова, А. Г. Данилов // *Международные научные исследования*. – 2017. – № 1 (30). – С. 102–105.
17. Пахахинова З. З., Батоцыренов Э. А., Бешенцев А. Н. Картографическая регистрация базовых пространственных объектов для мониторинга природопользования // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 94–104.
18. Соколов А. П., Сюнев В. С. Логистический подход к обоснованию технологий и параметров процессов комплексного освоения лесосырьевых баз // *Системы. Методы. Технологии*. – 2017. – № 3 (35). – С. 100–106.
19. Гук А. П., Алтынцев М. А. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэроснимках лесных массивов // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 68–77.
20. Середович В. А., Алтынцев М. А., Егоров А. К. Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 33–44.
21. Муковнина М. В. Оценка транспортных потерь лесхозов от бездорожья // *Вестник Московского государственного университета леса // Лесной вестник*. – 2006. – № 4. – С. 141–142.
22. Лебедева Т. А., Трубина Л. К. Модели лесных земель как базовые блоки геоинформационных систем мониторинга в землепользовании // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 178–189.

23. Лебедев Ю. В. Оценка лесных экосистем в экономике природопользования. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2011. – 547 с.

24. Мохирев А. П., Резинкин С. Ю. Совершенствование маршрутов доставки древесины с использованием ГИС // Forest Engineering : сборник материалов научно-практической конференции с международным участием. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2018. – С. 170–174.

25. Алексеев В. Е., Таланов А. В. Графы и алгоритмы. – М. : Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2016.

Получено 26.10.2018

© А. П. Мохирев, М. М. Герасимова, С. О. Медведев, 2018

FINDING ROUTE OF THE MINIMAL COST OF THE TRANSPORT PATH WHEN DELIVERING WOOD FROM THE CUTTING AREA

Aleskandr P. Mokhirev

Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 29, Pobedy St., Lesosibirsk, 662543, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (39145)6-28-03, e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru

Marina M. Gerasimova

Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 29, Pobedy St., Lesosibirsk, 662543, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (39145)6-28-03, e-mail: marina-gerasimov@list.ru

Sergey O. Medvedev

Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 29, Pobedy St., Lesosibirsk, 662543, Russia, Ph. D., Associate Professor, phone: (39145)6-28-03, e-mail: medvedev_serega@mail.ru

This article describes a solution algorithm which represents determination of the optimal routes and quantity of goods transportation when the delivery cost of these goods from the starting to the final point is minimal. The algorithm is based on Dijkstra's algorithm (shortest path search) and dynamic programming method. The algorithm is used for calculation of the optimal route when delivering wood from the cutting area. The special features of forest roads relate to transportation costs as well as to a road capacity. These depend on climate and environmental conditions of the route segment. The value includes both, costs depending on the quantity of the goods being transported (transportation), and costs not dependent on it (construction and rehabilitation of roads). The specificity is that in this problem rehabilitation (construction) and transportation costs might vary depending on the quantity of the goods being transported on the route segment.

Key words: solution algorithm, the smallest cost route, wood transport, optimal route, transport costs.

REFERENCES

1. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., & Rivest, R. L. (2001). *Introduction to Algorithms, C. Stein* (3d ed.). MIT Press, 1312 p.

2. Pallottino, S., & Scutellà, M. G. (1998). Shortest Path Algorithms in Transportation Models: Classical and Innovative Aspects. In *Equilibrium and Advanced Transportation Modelling*. P. Marcotte, & S. Nguyen (Eds.) (pp. 245–281). Kluwer.
3. Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., & Orlin, J. B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 846 p.
4. Heinimann, H. R. (2017). Forest road network and transportation engineering – state and perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38(2), 155–173.
5. De vries, F. W. T. P. (1975). The cost of maintenance processes in plant cells. *Annals of Botany*, 39(1), p.77.
6. Palmgren, M., Ronnqvist, M., & Varbrand, P. (2003). A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound. *International Transactions in Operational Research (IFORS)*, 10(5), 433–447.
7. Kovács, P. (2013). EGRES Technical Report No. 4. Minimum-cost flow algorithms: An experimental evaluation.
8. Borisov, G. A., Kukin, V. D., Kuzina, V. I. (2001). Methods to find the most suitable option for the network of forest roads. *Lesnoj zhurnal [Forestry Journal]*, 3, 63–70 [in Russian].
9. Antonova, T. S., & Tyurin, N. A. (2017). Planning of logistic streams of the logging enterprise. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii [News of the St. Petersburg Timber College]*, 218, 61–71 [in Russian].
10. Sushkov, A. S. (2015). Application of a method of network planning for improvement of traffic flows of forest products. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and Road Cars]*, 6, 30–32 [in Russian].
11. Solopanov, M. S., Karpushina, V. E., & Sushkov, S. I. (2014). To a question of development of a technique of improvement of transport and cargo streams at the enterprises of a forest complex. *Voronezhskij nauchno-tekhnicheskij Vestnik [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]*, Vol. 3. No. 4 (10), 80–84 [in Russian].
12. Orlin, J. B. (1983). Maximum-throughput dynamic network flows. *Mathematical Programming, North-Holland*, 27, 214–231.
13. Mokhirev, A. P., Gorjaeva, E. V., Egarmin, P. A. (2017). Creating a geo-information resource for planning logging production *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 137–153 [in Russian].
14. Mokhirev, A. P., Pozdnyakova, M. O., Medvedev, S. O., & Mammatov, V. O. (2018). Assessment of availability of wood resources using geographic information and analytical systems (the Krasnoyarsk territory as a case study). *Journal of Applied Engineering Science*, 3(16), 313–319. doi: 10.5937/jaes16-16908.
15. Mokhirev, A. P., & Egarmin, P. A. (2011). Geographical Information System for Planning the Optimal Development of the Forest Fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods Technology]*, 4(12), 172–177 [in Russian].
16. Kozinov G. L., Enaleeva-Bandura I. M., Mirgunova V. G., Danilov A. G. (2017). Modeling of transport and technological process of delivery of forest raw materials with application of system approach. *Mezhdunarodnye nauchnye issledovaniya [International Scientific Research]*, 1(30), 102–105 [in Russian].
17. Pahahinova, Z. Z., Batocyrenov, Je. A., & Beshencev, A. N. (2016). Cartographic registration of basic spatial objects for monitoring environmental management. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 94–104 [in Russian].
18. Sokolov, A. P., & Syunyov, V. S. (2017). Logistic approach to justification of technologies and parameters of processes of complex development of forest raw bases. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technology]*, 3(35), 100–106 [in Russian].
19. Guk, A. P., & Altyncev, M. A. (2017). Automatic identification of relevant points in aerial photographs of forest areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 68–77 [in Russian].

20. Seredovich, V. A., Altyncev, M. A., & Egorov, A. K. (2017). Determination of road surface evenness index according to mobile laser scanning data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 33–44 [in Russian].
21. Mukovnina, M. V. (2006). Assessment of transport losses of forestries from off road terrain//the Bulletin of Moscow State University of the wood. *Lesnoj zhurnal [Forestry Journal]*, 4, 141–142 [in Russian].
22. Lebedeva, T. A., & Trubina, L. K. (2017). Models of forest lands as basic blocks of geoinformation monitoring systems in land use. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 178–189 [in Russian].
23. Lebedev, Ju. V. (2011). *Ocenka lesnyh ehkositem v ehkonomie prirodnopol'zovaniya [Evaluation of forest ecosystems in environmental economics]*. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS Publ., 547 p. [in Russian].
24. Mokhirev, A. P., & Rezinkin, S. Ju. (2018). Improvement of wood delivery routes using GIS. In *Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem: Forest Engineering [Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation: Forest Engineering]* (pp. 170–174) [in Russian].
25. Alekseev, V. E., & Talanov, A. V. (2016). *Grafy i algoritmy [Graphs and Algorithms]*. National Open University "INTUIT" Publ. [in Russian].

Received 26.10.2018

© A. P. Mokhirev, M. M. Gerasimova, S. O. Medvedev, 2018

УДК 528.9:574

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОЗЕЛЕНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Полина Ильинична Муллаярова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, кафедра экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: lina181991@mail.ru

Ольга Николаевна Николаева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: onixx76@mail.ru

Людмила Константиновна Трубина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природопользования, тел. (383)361-08-86, e-mail: trubinalk@rambler.ru

В статье изложен подход к геоэкологической оценке озелененных территорий специального назначения и созданию картографического обеспечения, отображающего результаты оценки. Отмечено методологическое несовершенство существующих официальных процедур инвентаризации городского зеленого фонда. Кратко охарактеризованы особенности отрицательного антропогенного воздействия, оказываемого на различные категории городских зеленых насаждений. Обоснована необходимость уделять особое внимание состоянию озелененных территорий специального назначения, испытывающих максимальное техногенное давление. Перечислены основные показатели геоэкологической оценки озелененных территорий специального назначения, позволяющие учесть как экологическое состояние отдельных деревьев, так и рациональность их размещения относительно техногенных объектов городской среды. Приведен математический аппарат для определения показателей геоэкологической оценки озелененных территорий специального назначения. Описан опыт создания картографической продукции, отображающей результаты геоэкологической оценки озелененных территорий специального назначения.

Ключевые слова: городское озеленение, озелененные территории специального назначения, геоинформационное картографирование, геоэкологическая оценка, цифровые карты, ГИС-технологии.

Введение

Городские зеленые насаждения (ГЗН) являются важным элементом городской среды, выполняющим множество функций, сводящихся к компенсации вредного воздействия техногенных объектов в пределах города на окружающую среду и здоровье населения [1–5]. Увеличение доли городских земель, занятых зелеными насаждениями, является одной из ведущих тенденций современного городского планирования и строительства [6]. Стремление как можно более полно использовать возможности городской среды для создания новых объектов озеленения проявляется также в популяризации вертикального озеленения [7, 8].

Зачастую сформировавшиеся на базе участков естественной растительности, сохраняемой в ходе исторического развития города, ГЗН тем не менее нуждаются в постоянном поддержании и контроле их состояния, так как они подвергаются интенсивному антропогенному давлению, обусловленному как хозяйственной деятельностью, так и рекреационной активностью населения [1, 9]. Для получения объективной информации о состоянии ГЗН необходимо не только выполнять их инвентаризацию, но и оценивать их состояние. Эффективное решение этих задач достигается применением современных компьютерных и геоинформационных технологий, которые оптимизируют процесс комплексного моделирования размещения ГЗН [10–12] и обеспечивают возможность изучения особенностей функционирования ГЗН на разных территориальных уровнях [13].

Постановка проблемы

В настоящее время, согласно действующей нормативной документации [14, 15], а также локальным законодательным актам [16, 17], процедура управления ГЗН не предусматривает выполнения геоэкологической оценки их состояния на уровне объектов озеленения (парков, скверов и т. п.) или на уровне отдельных деревьев, которые в совокупности образуют конкретный объект озеленения. Проводится лишь визуальная оценка состояния единичных, наиболее поврежденных деревьев, после чего принимается решение об их ликвидации или о проведении мероприятий по их содержанию и реконструкции.

Также следует отметить, что в вышеприведенных документах не диверсифицирован перечень мероприятий по мониторингу и содержанию зеленых насаждений в зависимости от категории объекта озеленения (общего, ограниченного или специального назначения). Между тем, хотя все перечисленные категории ГЗН испытывают достаточно интенсивное отрицательное антропогенное воздействие, характер этого воздействия весьма различается. Так, например, объектам озеленения общего назначения (паркам, скверам, внутриквартальному озеленению) наибольший ущерб наносит уплотнение почв в процессе вытаптывания и парковки транспортных средств (зачастую несанкционированной), что, в свою очередь, отрицательно сказывается на развитии корневой системы деревьев, а также зачастую приводит к механическим повреждениям их наземных частей. Объекты озеленения ограниченного назначения подвержены несколько меньшей антропогенной нагрузке, так как расположены в зоне доступа сравнительно узкого круга лиц (в пределах школ, детских садов, лечебных учреждений, промышленных площадок предприятий и пр.). Однако здесь могут отмечаться нетипичные для прилегающей территории превышения концентраций отдельных загрязняющих веществ, обусловленные спецификой объекта (например, на территории больничного сквера может выявиться загрязнение биологическими агентами, на территории зеленой зоны промышленного предприятия – тяжелыми металлами и т. п.).

Особенности геоэкологического состояния объектов озеленения специального назначения (насаждений вдоль городских улиц, автомагистралей и пр.) обусловлены постоянным и интенсивным загрязнением воздушной среды и почв, на которых произрастают эти насаждения, в результате воздействия автомобильного транспорта. Из всех трех категорий объектов озеленения объекты озеленения специального назначения (ООСН) испытывают наибольший техногенный прессинг, выражающийся в интенсивном накоплении тяжелых металлов в надземных и подземных частях растений, снижении активности фотосинтеза, замедлении роста растений, появлении мутаций и т. п. Негативное влияние автотранспорта на биотические компоненты окружающей среды неоднократно рассматривалось российскими и зарубежными учеными [18–23].

Таким образом, ООСН нуждаются в детальном мониторинге и контроле их состояния для обеспечения их эффективного функционирования как «буфера», снижающего вредное воздействие автомобильного транспорта на качество окружающей среды и здоровье населения. Решение этой задачи невозможно без выполнения геоэкологической оценки состояния ООСН в целом и отдельных деревьев, входящих в их состав в частности.

Как было сказано ранее, современные руководящие и методические документы, действующие в области ведения городского хозяйства, не предусматривают проведение геоэкологической оценки ГЗН в целом и ООСН в частности. Поэтому далее будет изложен подход, предлагаемый авторами для геоэкологической оценки ООСН, основанный на современных достижениях геоэкологии, ГИС-технологий и геоинформационного картографирования.

Материалы и методы

Сбор исходных данных о пространственном размещении и состоянии древостоя в границах ООСН выполняется с использованием современных геодезических технологий и оборудования [10]. Собранные данные систематизируются и обрабатываются в среде ГИС для формирования базы данных ООСН, на основании которой рассчитываются показатели геоэкологической оценки.

Предлагается оценивать геоэкологическое состояние ООСН, учитывая следующие их характеристики:

- 1) жизненное состояние древостоя в границах ООСН;
- 2) степень повреждения древостоя в границах ООСН насекомыми-вредителями и болезнями леса;
- 3) рациональность планировочной структуры ООСН.

Оценка жизненного состояния древостоя выполняется в соответствии с действующими «Санитарными правилами в лесах Российской Федерации» [24]. Согласно этим правилам, вначале оценивается относительное жизненное состояние (ОЖС) каждого дерева в пределах пробной площади, выбранной в границах оцениваемой озелененной территории. Для этого используется приведенная в [24] шкала категорий состояния деревьев, позволяющая от-

нести каждое дерево к какой-либо из 5 категорий (здоровое, ослабленное, сильно ослабленное, усыхающее, сухостой). Более подробно эта шкала представлена в табл. 1 [23].

Таблица 1

Определение категории ОЖС отдельных деревьев

Категория дерева	Диагностические признаки			
	густота кроны, %	наличие мертвых сучьев, %	степень повреждения листьев, %	Индекс ОЖС, %
Здоровое	81–100	0–15	0–10	80–100
Ослабленное	55–85	15–45	10–45	50–79
Сильно ослабленное	20–55	45–65	45–65	20–49
Усыхающее	0–20	65–100	65–100	5–19
Сухостой	0	100	нет листьев	< 5

Далее определяется индекс жизненного состояния древостоя всей озелененной территории L_n . Для расчета используется формула, предложенная В. А. Алексеевым [25] и традиционно применяемая в современном российском лесоведении при проведении подобных исследований

$$L_n = 100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4/N, \quad (1)$$

где L_n – относительное жизненное состояние озелененной территории;

n_1 – запас древесины здоровых деревьев на пробной площади озелененной территории;

n_2, n_3, n_4 – то же для ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев соответственно;

100, 70, 40, 5 – коэффициенты, выражающие в процентах относительное жизненное состояние здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и усыхающих деревьев соответственно;

N – общий запас древесины деревьев на пробной площади озелененной территории (включая сухостой).

В заключение рассчитанные значения L_n переводятся в баллы (табл. 2).

Таблица 2

Балльная оценка состояния ООСН

Значение L_n (%)	80–100	50–79	20–49	Менее 20
Значение L_n (баллы)	5	4	3	2

Степень повреждения древостоя в границах ООСН насекомыми-вредителями и болезнями леса предлагается оценивать глазомерно по трехбалльной

шкале. При этом для каждого дерева в пределах пробной площади определяется степень повреждения кроны дерева (СПКД) (табл. 3).

Таблица 3

Балльная оценка степени повреждения древостоя в границах ООСН

СПКД (%)	Более 70	30–70	Менее 30
СПКД (баллы)	3	2	1

Далее определяется степень повреждения древостоя P_d , которая рассчитывается как среднее арифметическое между всеми значениями СПКД, определенными ранее.

Оценка рациональности планировочной структуры ООСН выполняется с учетом действующего СНиП [26], который регламентирует размещение ГЗН относительно зданий и сооружений.

В процессе оценки рациональности планировочной структуры ООСН выявляются и оцениваются (с опорой на вышеприведенный СНиП) следующие недостатки в планировочной структуре ООСН:

- размещение деревьев чрезмерно близко друг к другу;
- размещение деревьев чрезмерно близко к наружным стенам зданий и сооружений;
- размещение деревьев чрезмерно близко к краю проезжей части или дорожного сооружения, тротуара, садовой дорожки и т. п.;
- размещение деревьев чрезмерно близко к инженерным коммуникациям.

В соответствии с разработанной авторами методикой, индекс планировочной структуры ООСН I_{ps} рассчитывается по формуле

$$I_{ps} = 100 \cdot (N_d + N_z + N_p + N_k)/N, \quad (2)$$

где $N_d - N_k$ – количество деревьев в пределах ООСН, для которых не соблюден действующий СНиП в следующих аспектах:

- N_d – в части размещения деревьев относительно друг друга;
- N_z – в части размещения деревьев относительно наружных стен зданий и сооружений;
- N_p – в части размещения деревьев относительно проезжей части или дорожного сооружения, тротуара, садовой дорожки и т. п.;
- N_k – в части размещения деревьев относительно инженерных коммуникаций;
- N – общее количество исследуемых деревьев.

Таким образом, I_{ps} определяется сразу для всего ООСН, в то время как два ранее описанных оценочных параметра определяются сначала для каждого отдельного дерева, а потом для всего ООСН.

Пересчет рассчитанных значений I_{ps} в баллы предлагается выполнять на основании табл. 4.

Таблица 4

Балльная оценка рациональности планировочной структуры ООСН

I_{ps} (%)	Более 70	30–70	Менее 30
I_{ps} (баллы)	3	2	1

Оценка геоэкологического состояния ООСН осуществляется по предлагаемой авторами формуле

$$G_s = L_n + P_d + I_{ps}, \quad (3)$$

где G_s – индекс геоэкологического состояния данной озелененной территории;

L_n – индекс жизненного состояния древостоя всей ООСН;

P_d – индекс степени повреждения древостоя в границах ООСН;

I_{ps} – индекс рациональности планировочной структуры ООСН.

Значения G_s ранжируются в соответствии со следующей шкалой категорий геоэкологического состояния ООСН (табл. 5).

Таблица 5

Шкала категорий геоэкологического состояния ООСН

Значение G_s в баллах	Качественная характеристика	Рекомендации по управлению состоянием ООСН
4–6	Плохое состояние ООСН	Необходимы мероприятия по содержанию зеленых насаждений в пределах всей ООСН, включая ликвидацию отдельных деревьев
7–9	Удовлетворительное состояние ООСН	Необходимы мероприятия по содержанию зеленых насаждений на значительной территории ООСН
10–11	Оптимальное состояние ООСН	Необходимы мероприятия по содержанию зеленых насаждений для отдельных деревьев в пределах ООСН

Рассчитанные показатели геоэкологического состояния ООСН и отдельных деревьев в ее границах заносятся в ранее созданную базу данных состояния ООСН. Это дает возможность осуществлять их моделирование с использованием приемов пространственного анализа и отображать результаты моделирования на цифровых картах, формируя, таким образом, информационное обеспечение мероприятий по мониторингу и содержанию ООСН.

Результаты и обсуждение

Предложенный подход к геоэкологической оценке состояния ООСН с применением ГИС обеспечивает выявление проблемных и благополучных ООСН, оптимизирует процесс планирования мероприятий по их содержанию

и упрощает контроль выполнения запланированных работ. В случае наличия геопривязанных данных экологического мониторинга использование ГИС расширяет возможности в области исследования геоэкологического состояния ООСН во взаимосвязи с иными факторами окружающей среды (уровнями загрязнения воздуха, интенсивностью автомобильного потока и пр.), что позволяет объективнее оценивать состояние ООСН.

Для мониторинга и картографирования ООСН ранее была предложена методика, основанная на комплексном использовании свободно распространяемых данных дистанционного зондирования Земли и панорамной уличной съемки [27, 28]. Также были разработаны и апробированы на практике принципы геоинформационного картографирования ГЗН [29–31]. Накопленный опыт позволил создать геоинформационную модель геоэкологического состояния ООСН экспериментального района в пределах г. Новосибирска. На рисунке представлена картографическая визуализация этой модели, наглядно отображающая границы ООСН, размещение деревьев в пределах каждой ООСН, отдельные показатели геоэкологической оценки и общее геоэкологическое состояние каждого дерева.



Геоэкологическое состояние деревьев ООСН в пределах экспериментального района работ

Заключение

Геоэкологическая оценка объектов городского озеленения в целом и ООСН в частности является обязательным условием эффективного управления городским озеленением. Картографическое представление результатов геоэкологической оценки и их моделирование во взаимосвязи со сведениями об экологическом состоянии прочих компонентов окружающей среды обеспечивают эффективное планирование мероприятий по содержанию городского озеленения и контроль за их выполнением. К сожалению, выполнение обоих вышезаявленных действий не предусматривается действующей нормативной и методической документацией в области ведения городского хозяйства, что неоднократно подчеркивалось авторами [27, 28, 30].

Обоснованный в статье подход обеспечивает получение комплексной характеристики геоэкологического состояния как ООСН в целом, так и отдельных деревьев в его пределах, с учетом экологического состояния деревьев и рациональности их размещения в сложной, насыщенной техногенными объектами городской среде. Геоинформационное моделирование ООСН позволяет получать картографическую продукцию, детально характеризующую состояние ООСН, влияние на ООСН природных и техногенных факторов, и, в конечном счете, формирует информационную основу для планирования, проведения и контроля мероприятий по содержанию ООСН в процессе управления городским зеленым фондом.

В целом предлагаемый подход к геоэкологической оценке и геоинформационному моделированию состояния ООСН является первым шагом к формированию полноценной методологии мониторинга, оценки и прогноза состояния зеленого фонда города, базирующейся на использовании современных достижений дистанционного зондирования Земли, ГИС-технологий и геоинформационного картографирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трубина Л. К. Методологические аспекты экологической оценки состояния урбанизированных территорий // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. Междунар. науч. конгр. : Междунар. научн. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 2. – С. 200–203.
2. Шайхутдинова А. А., Ивлева Я. С. Городские зеленые насаждения как элемент системы экологического каркаса // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2016. – № 8 (161). – С. 91–96.
3. Stanganelli M., Gerundo C. Planning with Nature: Green Areas Configuration and Natural Cooling in Metropolitan Areas // International Conference on Computational Science and Its Applications. – Banff, Canada, 2015. – P. 648–661.
4. Ulsan N. G. The Guidelines of the Eco-City Based on Sustainable Urbanism // Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium. – Dubai, UAE, 2017. – P. 871–879.
5. Shalaby H. M., Sherif A., Altan H. The Impact of Urban Fabric on Natural Ventilation for the City of Alexandria // GeoMEast 2017: Towards Sustainable Cities in Asia and the Middle East. – Cairo, Egypt, 2017. – P. 136–150.

6. Integrated Green Cities: Urban Meets Forest—A Case Study of the Town of Trento / M. G. Cantiani, Al. Betta, I. De Meo, Al. Paletto, S. Tamanini, F. Maino // SSPCR 2017: Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions. – Bolzano (Italy), 2017. – P. 375–388.
7. Zhou M., Bonenberg W. Application of the Green Roof System in Small and Medium Urban Cities // Advances in Human Factors and Sustainable Infrastructure. Advances in Intelligent Systems and Computing / Charytonowicz J. (Eds). – Springer, Cham, 2016. – Vol 493. – P. 125–136
8. Nicolae I., Sorina P. Solutions to Reduce Energy Consumption in Buildings. Green Roofs Made up of Succulent Plants // Conference on Sustainable Energy: Nearly Zero Energy Communities. – Brasov, Romania, 2017. – P. 179–197.
9. Крючков А. Н. Мониторинг состояния городских зеленых насаждений как часть эффективного управления зеленым хозяйством Г. О. Тольятти // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 4–5. – С. 1023–1028.
10. Трубина Л. К., Баранова Е. И., Чагина Г. С. Геоинформационное картографирование и инвентаризация зеленых насаждений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. Междунар. науч. конгр. : Междунар. научн. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 82–86.
11. Effective Use of GIS Based Spatial Pattern Technology for Urban Greenery Space Planning: A Case Study for Ganesh Nagar Area of Nanded City / G. Kulkarni, D. Nilesh, Bh. Parag, P. Wasnik, K. Hambarde, P. Tamsekar, V. Kamble, V. Bahuguna // Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Computing and Applications. - Springer Singapore, 2015. – P. 123–132.
12. Sirirwardane M. S. P. M., Gunatilake Ja., Sivanandarajah S. Study of the Urban Green Space Planning Using Geographic Information Systems and Remote Sensing Approaches for the City of Colombo, Sri Lanka // Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment. – New Delhi, India, 2015. – P. 797–800.
13. Kuang X.-M., Chen J., Sun Ch.-F. Evaluation of Ventilation Effectiveness of Microscale and Middle-Scale Urban Green Belt Based on Computer Simulation // Low-carbon City and New-type Urbanization. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – P. 285–294.
14. Методика инвентаризации городских зеленых насаждений. – М., 1997 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.opengost.ru/iso/3087-metodika-inventarizacii-gorodskih-zelenyh-nasazhdeniy.html>
15. Правила создания, охраны и содержания зеленых насаждений в городах РФ от 15.12.1999 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://zakonbase.ru/content/base/48758>.
16. О Правилах создания, охраны и содержания зеленых насаждений в городе Новосибирске : решение Совета депутатов города Новосибирска 22.02.2012 № 539 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gorsovetnsk.ru/sessions/view/solution/3752>.
17. О генеральном плане Новосибирска : решение Совета депутатов города Новосибирска от 26.12.2007 № 824 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gorsovetnsk.ru/sessions/view/solution/3373/>.
18. Древесные растения Калининграда в условиях техногенной нагрузки автомагистралей / О. М. Бедарева, Е. А. Калинина, Л. С. Мурачева, А. В. Матюха // Аграрная Россия. – 2015. – № 2. – С. 28–30.
19. Артемьев О. С., Арсентьева А. А. Оценка влияния выбросов автотранспорта на прироста по диаметру стволов тополя бальзамического в городе Красноярске // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 4 (91). – С. 198–202.
20. Мироненко Е. В., Шлапакова С. Н. Влияние автотранспортных выбросов на качество семян древесных растений и выращенных из них сеянцев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2016. – Т. 11. – № 2 (40). – С. 29–33.

21. Алехина И. В., Мироненко Е. В. Влияние выбросов автотранспорта на сезонное развитие и репродуктивную способность Робинии Лжеакация // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. – 2018. – № 1 (50). – С. 79–85.
22. Zhenqi, C., Weichi, L. Toward a Green Transport System: A Review of Non-technical Methodologies for Developing Cities // Information Technology and Intelligent Transportation Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, Cham. – 2015. – Vol. 454. – P. 509–520.
23. Zhao J., Fang Zh., Zhao Ya. Study on Evaluation Index System of Urban Green Traffic Planning // International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety GITSS 2016: Green Intelligent Transportation Systems. – Nanjing, China, 2016. – P. 751–762.
24. О Правилах санитарной безопасности в лесах : Постановление Правительства РФ от 20.05.2017 № 607 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://static.government.ru/media/files/Mfd1F18EFBxQKN71slMyeeqyq8plfIOV.pdf>.
25. Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. – 1989. – № 4. – С. 51–57.
26. СНиП 2.07.01-89. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. – М. : Госстандарт. – 2011. – С. 174.
27. Муллаярова П. И. О модернизации существующей методики инвентаризации зеленых насаждений с учетом современных достижений аэрокосмических исследований и ГИС-технологий // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 132–142.
28. Муллаярова П. И. О необходимости совершенствования методики инвентаризации городских зеленых насаждений // Интерэкспо Гео-Сибирь 2017. Междунар. науч. конгр. : Междунар. научн. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 2. – С. 180–185.
29. Некоторые подходы к геоинформационному картографированию зеленых насаждений / Л. К. Трубина, П. И. Муллаярова, Е. И. Баранова, О. Н. Николаева // Интерэкспо Гео-Сибирь 2014. Междунар. науч. конгр. : Междунар. научн. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 68–73.
30. Инвентаризация городских зеленых насаждений средствами ГИС / Л. К. Трубина, О. Н. Николаева, П. И. Муллаярова, Е. И. Баранова // Вестник СГУГиТ. – Т. 22, № 3. – 2017. – С. 107–117.
31. Муллаярова П. И., Трубина Л. К., Николаева О. Н. Использование геоинформационных систем для изучения и контроля состояния зеленых насаждений урбанизированных территорий // Информационные технологии в экологии : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Году экологии в России. – Нижневартовск, 2018. – С. 90–94.

Получено 11.10.2018

© П. И. Муллаярова, О. Н. Николаева, Л. К. Трубина, 2018

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT AND MAPPING OF URBAN ROAD VERGES

Polina I. Mullayarova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: lina181991@mail.ru

Olga N. Nikolaeva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: onixx76@mail.ru

Lyudmila K. Trubina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Professor, Department of Ecology and Environmental Management, phone: (383)361-06-86, e-mail: trubinalk@rambler.ru

The article considers an approach to geocological assessment and mapping of urban road verges. The shortcomings of the existed methodological approach to inventory of urban green spaces are stated. The brief description of features of anthropogenic impact to the different classes of urban green spaces is given. The necessity to give particular attention to the urban road verges condition as the most affected by anthropogenic impact is substantiated. The main indicators of the tree condition and rational deployment of trees of urban road verges are listed. The mathematical tools for geocological assessment of urban road verges are characterized. A case-study of geocological assessment and mapping of urban road verges in Novosibirsk is described.

Key words: urban green spaces, urban road verges, geoinformation mapping, geocological assessment, digital maps, GIS techniques.

REFERENCES

1. Trubina, L. K. (2012). Methodological aspects of urban lands state ecological assessment]. In *Sbornik materialov Interehkspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distancionnye metoda zondirovaniya Zemli i foto-grammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 200–203). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
2. Shaikhutdinova, A. A. (2016). Urban green spaces as an element of the ecological framework system. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific Notes of Petrozavodsk State University]*, 8(161), 129–136 [in Russian].
3. Stanganelli, M., & Gerundo, C. (2015). Planning with Nature: Green Areas Configuration and Natural Cooling in Metropolitan Areas. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 648–661). Banff, Canada.
4. Ulsan, N. G. (2017). The Guidelines of the Eco-City Based on Sustainable Urbanism. In *Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium* (pp. 871–879). Dubai, UAE.
5. Shalaby, H. M., Sherif, A., & Altan, H. (2017). The Impact of Urban Fabric on Natural Ventilation for the City of Alexandria. In *GeoMEast 2017: Towards Sustainable Cities in Asia and the Middle East* (pp. 136–150). Cairo, Egypt.
6. Cantiani, M. G., Betta, Al., De Meo, I., Paletto, Al., Tamanini, S., & Maino, F. (2017). Integrated Green Cities: Urban Meets Forest – A Case Study of the Town of Trento. In *SSPCR 2017: Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions* (pp. 375–388). Bolzano, Italy.
7. Zhou, M., & Bonenberg, W. (2016). Application of the Green Roof System in Small and Medium Urban Cities. In Charytonowicz J. (Ed.), *Advances in Human Factors and Sustainable Infrastructure. Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 493* (pp. 125–136). Springer, Cham.
8. Nicolae, I., & Sorina, P. (2017). Solutions to Reduce Energy Consumption in Buildings. Green Roofs Made up of Succulent Plants. In *Conference on Sustainable Energy: Nearly Zero Energy Communities* (pp. 179–197). Brasov, Romania.

9. Kryuchkov, A. N. (2015). Monitoring of the state of urban green spaces as part of effective management of the green economy in Togliatti. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 17(4–5), 1023–1028 [in Russian].
10. Trubina, L. K., Baranova, E. I., & Chagina, G. S. (2013). GIS mapping and greenery inventory. In *Sbornik materialov Interehkspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distancionnye metoda zondirovaniya Zemli i foto-grammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoekologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 82–86). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
11. Kulkarni, G., Nilesh, D., Parag, Bh., Wasnik, P., Hambarde, K., Tamsekar, P., Kamble, V., & Bahuguna, V. (2015). Effective Use of GIS Based Spatial Pattern Technology for Urban Greenery Space Planning: A Case Study for Ganesh Nagar Area of Nanded City. In *Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Computing and Applications* (pp. 123–132). Springer Singapore.
12. Sirirwardane, M. S. P. M., Gunatilake, Ja., & Sivanandarajah, S. (2015). Study of the Urban Green Space Planning Using Geographic Information Systems and Remote Sensing Approaches for the City of Colombo, Sri Lanka. In *Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment* (pp. 797–800). New Delhi, India.
13. Kuang, X.-M., Chen, J., & Sun, Ch.-F. (2015). Evaluation of Ventilation Effectiveness of Microscale and Middle-Scale Urban Green Belt Based on Computer Simulation. In *Low-carbon City and New-type Urbanization* (pp. 285–294). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
14. *Metodika inventarizacii gorodskih zelenyh nasazhdenij [Methodology inventory of urban green space]*. (1997). Moscow. MinStroj RF. Retrieved from <http://www.opengost.ru/iso/3087-metodika-inventarizacii-gorodskih-zelenyh-nasazhdeniy.html> [in Russian].
15. The rules of creation, protection and maintenance of green areas in the cities of the Russian Federation of December 15, 1999. Retrieved from <https://zakonbase.ru/content/base/48758> [in Russian].
16. Decision of the Council of Deputies of the City of Novosibirsk on February 22, 2012 No. 539. On the Rules for the Creation, Protection and Maintenance of Greenery in the City of Novosibirsk. Retrieved from <http://gorsovetnsk.ru/sessions/view/solution/3752> [in Russian].
17. The decision of Council of deputies of Novosibirsk city of December 26, 2007 No. 824. On the General plan of Novosibirsk. Retrieved from: <http://gorsovetnsk.ru/sessions/view/solution/3373/> [in Russian].
18. Bedareva, O. M. (2015). Woody plants of Kaliningrad in conditions of technogenic load of motorways. *Agrarnaya Rossiya [Agrarian Russia]*, 2, 28-30. [in Russian].
19. Artem'ev, O. S., & Arsent'eva, A. A. (2014). Estimation of the influence of motor vehicle emissions on increments in diameter of poplar balsamic trunks in the city of Krasnoyarsk. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [The Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, 4(91), 198–202 [in Russian].
20. Mironenko, E. V., & Shlapakova, S. N. (2016). Influence of road transport emissions on the quality of seeds of woody plants and seedlings grown from them. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Kazan State Agrarian University]*, 2(40), 29–33 [in Russian].
21. Alekhina, I. V., & Mironenko, E. V. (2018). Influence of motor transport emissions on seasonal development and reproductive capacity of Robinia Lzheakatsii. *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V. R. Filippova [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after. V. R. Philippova]*, 1(50), 79–85 [in Russian].
22. Zhenqi, C., & Weichi, L. (2015). Toward a Green Transport System: A Review of Non-technical Methodologies for Developing Cities. In *Information Technology and Intelligent Trans-*

portation Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol 454* (pp. 509–520). Springer, Cham.

23. Zhao, J., Fang, Zh., & Zhao, Ya. (2016). Study on Evaluation Index System of Urban Green Traffic Planning. In *International Conference on Green Intelligent Transportation System and Safety GITSS 2016: Green Intelligent Transportation Systems* (pp. 751–762). Nanjing, China.

24. Resolution of the Government of the Russian Federation of May 20, 2017 No. 607. On the Rules of Sanitary Security in the Forests. Retrieved from <http://static.government.ru/media/files/Mfd1FI8EFBxQKN71slMyeeqyq8plfIOV.pdf> [in Russian].

25. Alekseev, V. A. (1989). Diagnosis of the state of life of trees and stands. *Lesovedenie [Forest Science]*, 4, 51–57 [in Russian].

26. SNiP 2.07.01-89. Town planning. Planning and development of urban and rural settlements. Moscow: Gosstandart Publ., 174 p.

27. Mullayarova, P. I. (2018). On modernization of current methods of urban green spaces inventory taking into account the achievements of remote sensing and Geographic Information System. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 132–142 [in Russian].

28. Mullayarova, P. I. (2017). On the need to improve the methodology of inventory of urban green spaces. In *Sbornik materialov Interehkspo GEO-Sibir'-2017: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distancionnye metoda zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoehkologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 180–185). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

29. Trubina, L. K., Mullayarova, P. I., Baranova, E. I., & Nikolaeva, O. N. (2014). Some approaches to geoinformation mapping green plants. In *Sbornik materialov Interehkspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Distancionnye metoda zondirovaniya Zemli i fotogrammetriya, monitoring okruzhayushchej sredy, geoehkologiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: Vol. 2. Remote Sensing Methods of the Earth and Photogrammetry, Environmental Monitoring, Geoecology]* (pp. 68–73). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

30. Trubina, L. K., Nikolaeva, O. N., & Mullayarova, P. I. (2017). GIS-based inventory of urban green spaces. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 107–117 [in Russian].

31. Mullayarova, P. I., Trubina, L. K., & Nikolaeva, O. N. (2017). The use of geoinformation systems for studying and monitoring the state of green spaces of urbanized territories. In *Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Godu ehkologii v Rossii: Informacionnye tekhnologii v ehkologii [Proceedings of Russian Scientific and Practical Conference devoted to the Year of Ecology in Russia: Information Technology in Ecology]* (pp. 90–94). Nizhnevartovsk [in Russian].

Received 11.10.2018

© P. I. Mullayarova, L. K. Trubina, O. N. Nikolaeva, 2018

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

К 70-ЛЕТИЮ В. И. ТАТАРЕНКО, ПРОФЕССОРА, ПОЧЕТНОГО РАБОТНИКА ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РФ, ПОЧЕТНОГО РАБОТНИКА ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

Валерий Иванович Татаренко родился 1 ноября 1948 г. в с. Привольное Кокчетавской области (Казахстан). В 1966 г. окончил 11 классов Константиновской средней школы. За работу бригадиром школьной производственной бригады был награжден медалью «За освоение целинных и залежных земель»

В 1966 г. поступил в Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, который закончил с отличием по специальности «астрономогеодезия» в 1971 г. В 1970 г. его научная работа «Расчет орбит ИСЗ для геодезических целей» была награждена золотой медалью Всесоюзного конкурса лучших студенческих работ.

По окончании вуза В. И. Татаренко был оставлен ассистентом на кафедре геодезии, в 1972 г. – был призван на воинскую службу, вернулся в НИИГАиК (ставшем в 1994 г. академией, позднее университетом – СГУГиТ) в 1981 г., где до настоящего времени успешно работает, став заведующим кафедрой, доктором наук, профессором.

В 1982 г. был назначен на должность декана по работе с иностранными учащимися. На обучение в вуз в этот период принято более 400 граждан из ГДР, Монголии, Венгрии, Кубы, Вьетнама, Лаоса, Китая. Все выпускники этих лет получили дипломы инженеров и магистров, стали руководителями и известными специалистами, а 13 из них – кандидатами и докторами наук. В этот период в вузе создается кафедра русского языка, а на базе деканата формируется подготовительное отделение, осуществляющее с 1993 г. обучение иностранных граждан на контрактной основе. На подготовительном отделении за период с 1981 по 2005 г. прошли подготовку около 700 иностранных граждан.

В 1992 г. В. И. Татаренко назначается проректором по внешнеэкономической деятельности СГГА и успешно работает в этой должности более 14 лет, способствуя расширению международных связей и международного авторите-



та СГГА, в том числе в рамках развиваемых с его участием международных форумов «ГЕО-Сибирь» и «Сиббезопасность».

Организационно-образовательную работу В. И. Татаренко успешно совмещает с научной деятельностью. В 1986 г. он защищает кандидатскую, а в 1999 г. – докторскую диссертацию, став первым в истории вуза доктором экономических наук. В 2001 г. ему присвоено звание профессора.

В этом же году по инициативе В. И. Татаренко на базе СГГА решением ВАК РФ формируется межрегиональный диссертационный совет Д 212.1251.03 по экономике природопользования (08.00.05), председателем которого назначается Валерий Иванович. За время работы (до 2006 г.) в совете было успешно защищено около 50 докторских и кандидатских диссертаций, в том числе 8 – под научным руководством юбиляра.

С 2000 г. до настоящего времени В. И. Татаренко руководит созданной им кафедрой безопасности жизнедеятельности (в настоящее время – кафедра технологической безопасности).

Он автор более 250 научных и научно-методических работ, в том числе двух учебников, ряда монографий и учебных пособий, двух авторских свидетельств и 1 патента, является признанным наставником обучающихся в области экономики природопользования и экономики труда. Под руководством В. И. Татаренко успешно защищено 19 диссертаций, в том числе 3 докторских, сформирована научная школа.

Труд Валерия Ивановича Татаренко получил высокую оценку. Он награжден орденом Дружбы (ГДР), медалью «За освоение целинных и залежных земель», рядом юбилейных медалей и знаков отличий, в том числе «Ветеран труда», «За вклад в развитие НСО», «За труд на благо города», неоднократно отмечен Почетными грамотами министерств и ведомств, Представительства Президента в СФО, губернатора НСО, мэрии г. Новосибирска и др. В. И. Татаренко является действительным членом РАЕН, Российской экологической академии, Почетным профессором Шеньянского технологического университета (КНР), Дрезденского технического университета (Германия) и др.