

ИЗДАНИЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ



EDITION OF MOSCOW STATE UNIVERSITY
OF GEODESY AND CARTOGRAPHY

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА

2016, Том 60, № 4

IZVESTIA VUZOV
GEODESY
AND AEROPHOTOSURVEYING

2016, Vol. 60, # 4

МОСКВА 2016 MOSCOW

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1957 г. ВЫХОДИТ ШЕСТЬ РАЗ В ГОД

ISSN 0536-101X (print)

Входит в Перечень ВАК (Приказ Минобрнауки РФ от 01.12.2015 №13-6518)
и RSCI (Russian Science Citation Index) на платформе Web of Science

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В.П. САВИНЫХ

МАЙОРОВ А.А. (зам. главного редактора), БОНДУР В.Г., ВЕРЕЩАКА Т.В., ГВИШИАНИ А.Д.,
ДЕНИСЕНКО О.В., ЖУРКИН И.Г., КАРПИК А.П., КЛЮШИН Е.Б., МАЛИННИКОВ В.А., МАРКУЗЕ Ю.И.,
МАЗУРОВА Е.М., НЕЙМАН Ю.М., НЕПОКЛОНОВ В.Б., НЕХИН С.С., ОБЕРСТ ЮРГЕН (Германия),
ПАВЛОВ В.И., ПИМШИН Ю.И., СИЗОВ А.П., УСТАВИЧ Г.А., ЧИБУНИЧЕВ А.Г., ЯКУШЕНКОВ Ю.Г.,
ЯМБАЕВ Х.К., ЯШКИН С.Н.

IZVESTIA VUZOV GEODESY AND AEROPHOTOSURVEYING

FOUND IN 1957. PUBLICATION FREQUENCY IS 6 TIMES A YEAR

ISSN 0536-101X (print)

On the list of Higher Attestation Commission

(Decree of The Ministry of Education and Science of Russian Federation 01.12.2015 #13-6518)
and RSCI (Russian Science Citation Index) on Web of Science platform

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

SAVINYKH V.

MAYOROV A. (deputy chief editor), BONDUR V., CHIBUNICHEV A., GVISHIANI A., DENISENKO O., KARPIK
A., KLIUSHIN E., MALINNIKOV V., MARCUSE Yu., MAZUROVA E., NEIMAN Yu.,
NEPOKLONOV V., NEKHIN S., OBERST JÜRGEN (Germany), PAVLOV V., PIMSHIN Yu., SIZOV A.,
USTAVICH G., YAKUSHENKOV Yu., YAMBAYEV Kh., YASHKIN S., VERESHCHAKA T., ZHURKIN I.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

105064, Москва, Гороховский пер., 4, оф. 260

тел. 8 (499) 261-8286

e-mail: redakcia@miiigaik.ru

<http://journal.miiigaik.ru>

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ

Зав. редакцией Е.А. Евтеева

Редакторы: К.В. Любомирова

М.Е. Шевченко

Верстка Б.В. Кузнецов

Графика А.Ю. Боков

Перевод Е.Б. Кузнецова

© МИИГАиК, 2016

Сдано в набор 01.08.2016

Подписано в печать 29.08.2016

Формат 60×90¹/₈. Усл. печ. л. 18,0

Тираж 150 экз. Заказ 102

Отпечатано в типографии МИИГАиК

Индекс в каталоге Роспечать 70365

Учредитель: Государственный комитет СССР по народному образованию
Журнал зарегистрирован Государственным комитетом СССР по печати.
Регистрационное свидетельство от 26 октября 1990 г. №743

УДК 528.28; 528.2; 528:629.78

АСТРОНОМИЯ, ГРАВИМЕТРИЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ

ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО УСКОРЕННОГО РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

©2016 А.Н. Черний

Академия электротехнических наук Российской Федерации, Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена одному из важнейших вопросов современной астрофизики и космологии в целом, связанному с пониманием причины ускоренного расширения Вселенной. Изложена история и физика инфляционной модели расширяющейся Вселенной. Найдена теоретическая связь между ускоренным расширением Вселенной и скоростью движения световых фотонов в космическом вакууме. Получена формула, позволяющая определить плотность космического вакуума по наблюдаемому значению красного космологического смещения.

Ключевые слова: Большой взрыв, ускоренное расширение Вселенной, скорость света, астрофизика, общая теория относительности, красное космологическое смещение, квазар

FROM BIG BANG TO ACCELERATION OF EXPANSION

©2016 Cherniy A.

Russian academy of electrical engineering, Moscow, Russia

Abstract. The article is dedicated to the acceleration of expansion as an important problem of modern astrophysics and cosmology. The article contains information about historical background of inflation expanding model and its main characteristics are described. A theoretical link between acceleration of expansion and motion speed of photons in space vacuum is shown. A formula that makes possible to calculate space vacuum density taking into account an observed value of cosmological red shift.

Keywords: the Big Bang, acceleration of expansion, speed of light, astrophysics, theory of general relativity, gravitational radiation (wave), gravitational detector (antenna), neutron star, black hole, cosmological red shift, quasar.

*Радость видеть и понимать есть самый прекрасный ... дар природы.
А. Эйнштейн*

Согласно современной инфляционной космологической теории, Вселенная была рождена около 14 млрд лет назад в результате Большого взрыва из одной единственной точки, называемой сингулярностью.

Впервые гипотеза о Большом взрыве в рамках теории «горячей Вселенной» была выдвинута в 1948 г. Г.А. Гамовым — выдающемся американским физиком-теоретиком. Георгий Антонович Гамов родился 4 марта 1904 г. в Одессе. В 1926 г. окончил Ленинградский государственный университет. Любовь к физике зародилась со студенческих лет. Особенно его увлекала теория относительности Эйнштейна, лекции по которой читал профессор А.А. Фридман. Свои научные знания

Г.А. Гамов совершенствовал в научном кружке по теоретической физике, созданном им вместе с Л.Д. Ландау и Д.Д. Иваненко. Эту научную троицу часто в шутку называли «три мушкетерами». В 1931–1933 гг. работал в Ленинградском физико-техническом институте. В 1932 г. Г.А. Гамов избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. В октябре 1933 г. Г.А. Гамов принимал участие в работе Сольвеевского конгресса в Брюсселе, после которого он не вернулся в СССР. В 1938 г. был исключен из списков членов-корреспондентов Академии наук СССР, восстановлен в 1990 г.

В своей автобиографии, изданной в Нью-Йорке в 1970 г. (уже после смерти ученого), Г.А. Гамов писал: «Я никогда не чувствовал,

что мне хочется покинуть страну, в которой я родился, и если бы мне было разрешено путешествовать за рубеж и осуществлять контакты с мировой наукой, я всегда бы возвращался домой». С 1934 г. Г.А. Гамов проживал и работал в США. В 1934–1956 гг. — профессор университета Дж. Вашингтона, а с 1956 г. — университета штата Колорадо.

Научные работы Г.А. Гамова были посвящены квантовой механике, атомной и ядерной физике, астрофизике, космологии, истории физики. В рамках модели «горячей Вселенной» им было предсказано реликтовое излучение, которое было подтверждено экспериментально в 1965 г. По мнению А.М. Черепашука и А.Д. Чернина, как минимум, три его научных работы могли быть удостоены Нобелевской премией [1, с. 219].

Мы не случайно привели некоторые сведения из жизни Г.А. Гамова, так как длительное время в нашей стране вклад этого талантливого ученого в фундаментальную науку, в частности в космологию, к сожалению, замалчивался.

В таблице приведены события, которые происходили во Вселенной, начиная с момента 10^{-2} с после ее рождения в результате Большого взрыва [2, с. 188].

Согласно модели «горячей Вселенной» расширение Вселенной началось в результате взрыва сингулярности, где плотность и давление вещества равны бесконечности. Из теории Пенроуза–Хокинга известно, что сингулярность образуется в центре черной дыры в результате катастрофического сжатия материи в процессе релятивистского гравитационного коллапса. Следовательно, можно предположить, что Большому взрыву предшествовал глобальный гравитационный коллапс с образо-

ванием вселенской черной дыры и вселенской сингулярности.

В течение первых мгновений после Большого взрыва, когда температура протоматерии значительно превышала 10^{12} К, а ее плотность была близка к бесконечности, в кипящем вселенском «бульоне» должны были происходить быстро протекающие экзотические реакции, которые невозможно описать с позиции современной физики. Есть предположение о том, что в первые мгновения рождения Вселенной все четыре фундаментальные силы были слиты воедино. Считают также, что к концу первой миллионной доли секунды вещество Вселенной уже содержало релятивистские частицы в виде постоянно взаимодействующих между собой элементарных частиц и античастиц, а также высокоэнергичных фотонов. Причем вся кипящая масса находилась в состоянии теплового равновесия. Аннигиляция протоматерии продолжалась до тех пор, пока плотность энергии фотонов превышала значение энергии рождения частиц. По мере расширения Вселенной плотность и температура ее вещества падали; через 10^{-2} с после Большого взрыва температура снизилась приблизительно до 10^{11} К, став ниже минимального значения, при котором могут рождаться барионы (протоны и нейтроны). Интересно, что некоторые барионы избежали аннигиляции со своими античастицами, в противном случае современная Вселенная не содержала бы вещества. Данный феномен называется барионной асимметрией Вселенной; ее причины ученые объяснить пока не могут.

В таблице приведены физические данные о состоянии вещества Вселенной до ее возраста 700 000 лет, когда Вселенная стала прозрачной для электромагнитного излучения.

Возраст Вселенной	Температура, К	Состояние и состав вещества
10^{-2} с	10^{11}	п, р, e^- , e^+ , n , n^- в тепловом равновесии; п и р в одинаковом количестве
10^{-1} с	$3 \cdot 10^{10}$	Те же частицы, что и выше, но отношение числа нейтронов к числу протонов $n:p \approx 3:5$
1 с	10^{10}	п, n^- отделяются от остальных частиц; e^- , e^+ начинают аннигилировать; $n:p \approx 1:3$
13,8 с	$3 \cdot 10^9$	Начинается образование D и ${}^4\text{He}$; исчезают e^- , e^+ ; есть также свободные п и р
35 мин	$3 \cdot 10^8$	Фиксируется количество D и ${}^4\text{He}$ по отношению к числу протонов и электронов: ${}^4\text{He}/\text{H} \sim 22\text{--}28\%$ (по массе)
$7 \cdot 10^5$ лет	$3 \cdot 10^3$	Химическая энергия связи становится достаточной, чтобы образовались устойчивые нейтральные атомы. Теперь Вселенная прозрачна для излучения. Вещество начинает доминировать над излучением

Пояснение к таблице: п — нейтрон, р — протон, e^- — электрон, e^+ — позитрон, n — нейтрино, n^- — антинейтрино, D — дейтерий, H — водород, He — гелий.

В 1998–1999 гг. две группы астрономов, одна в Австралии, а другая в США, проводили измерения зависимости светимости сверхновых звезд типа Ia далеких галактик от расстояния до них. Наблюдения показали, что светимость сверхновых падает с расстоянием сильнее, чем согласно расчетам по фридмановской модели с нулевым космологическим членом. Быстрое ослабление светимости сверхновых пытались объяснить наличием межзвездного газа в галактиках, эволюцией сверхновых во времени и другими факторами, но все эти доводы оказались несостоятельными [1, с. 248; 3, с. 230].

По данным астрономических наблюдений за вспышками сверхновых типа Ia далеких галактик был построен график зависимости космологического расстояния R от времени t , прошедшего после Большого взрыва в точке O до вспышки сверхновой (рис. 1). Согласно этому графику в настоящее время t_0 (точка a на оси t) расширение Вселенной происходит ускоренно почти по экспоненциальному закону [1, с. 238]. Ранее, до времени $t_1 \approx 6-8$ млрд лет, оно происходило с замедлением. Истинные причины ускоренного расширения Вселенной для науки пока не понятны. Об этом подробно написано в работе [4].

За открытие ускоренного расширения Вселенной в 2011 г. нобелевская премия по физике вручена американским космологам Солу Перлмуттеру (Saul Perlmutter), Брайану Шмидту (Brian Schmidt) и Адаму Риссу (Adam Riess).

Известно, что скорость света зависит от плотности оптической среды, в которой он распространяется [5, с. 536]:

$$u = c/n, \quad (1)$$

где n — абсолютный показатель преломления света данной среды по отношению к вакууму (при $n=1$ скорость света $u=c=2,99792458 \cdot 10^8$ м/с).

На рис. 2 представлено графическое отображение этой зависимости.

Величина $n > 1$ для всех сред, кроме вакуума, где абсолютное значение n находится в интервале от 0 до 1. Чем больше значение n для среды, тем более оптически плотной она является. Так, например, показатель преломления морской воды на глубине 100 м в зеленом диапазоне спектра $n=1,4$. Введя это значение в формулу (1) в итоге имеем $u=2,14073183 \cdot 10^8$ м/с.

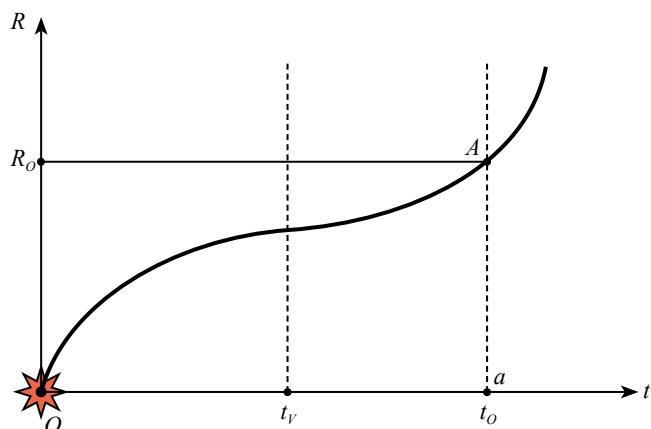


Рис. 1. График ускоренного расширения Вселенной

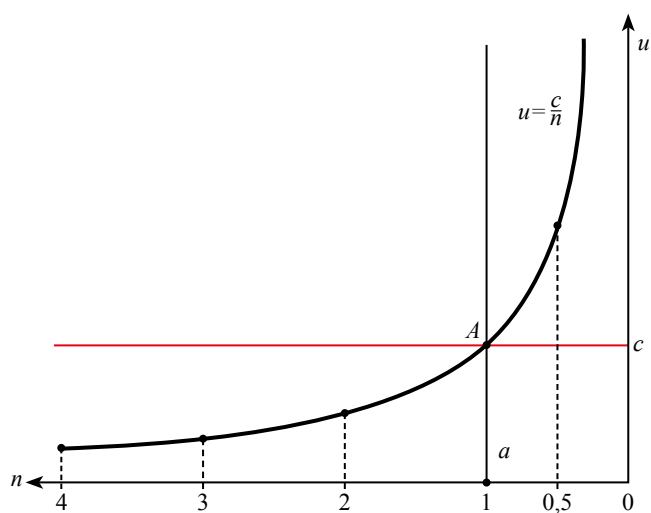


Рис. 2. Зависимость скорости света от плотности оптической среды

Это значение на $85\,719\,275$ м/с меньше скорости света в вакууме.

Согласно соотношению (1) при $n < 1$, $u > c$. Но как же так, ведь скорость света c является не только одной из главных астрономических постоянных, но и принадлежит к фундаментальным физическим постоянным, определяющей предельную скорость, с которой может передаваться физическое взаимодействие? В научных источниках нам не удалось найти работ, описывающих распространение света в вакуумной среде с $n < 1$.

Динамика распространения фронта световой волны, движущийся вдоль оси n в направлении уменьшения оптической плотности, характеризуется дифференциальным уравнением, полученным на основании (1):

$$du/dn = c/n^2 = u/n. \quad (2)$$

Из этого простого уравнения следует, что скорость света экспоненциально возрастает; при $n \rightarrow 0$ и $u \rightarrow \infty$, что хорошо видно на графике рис. 2.

Анализируя графики рис. 1 и 2, обращаешь внимание на удивительное сходство кривых по возрастающей, начиная от точки *A*. Это конечно не случайное совпадение. В этом ответ на наш вопрос. В интервале $0 < n < 1$ фотоны света движутся со скоростью $u > c$ из-за падения плотности космической среды в результате ускоренного расширения Вселенной.

Справедливости ради надо отметить, что впервые феномен расширения Вселенной экспериментально обнаружил знаменитый американский астрофизик Э.П. Хаббл, который в 1929 г. получил зависимость скорости удаления v внегалактических объектов, вызванного расширением Вселенной, от расстояния до них R [6, с. 709].

$$v = cz = HR. \quad (3)$$

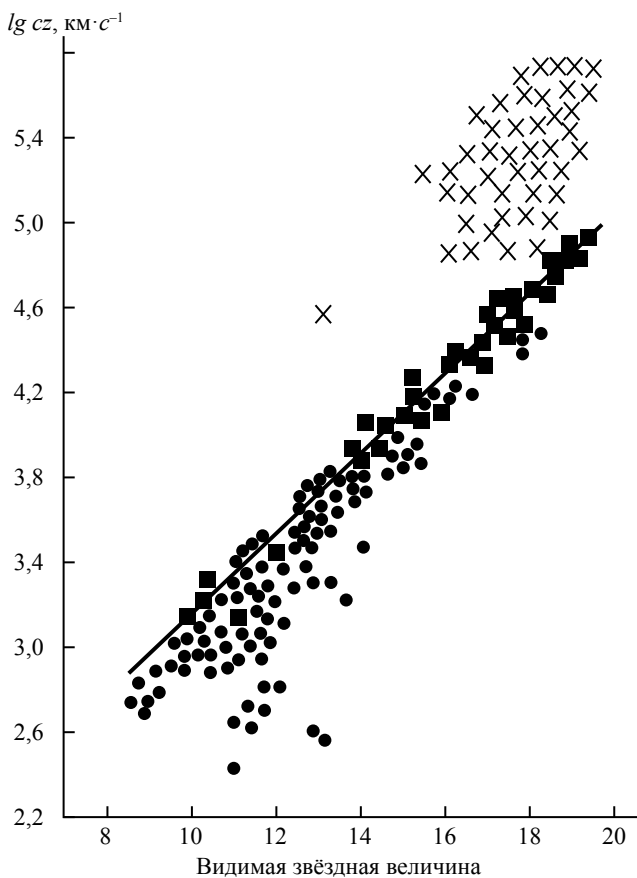


Рис. 3. Диаграмма Хаббла:

× — квазары; ■ — ярчайшие галактики в скоплениях;
● — галактические поля

Согласно закону Хаббла (3) скорость внегалактических объектов возрастает по мере увеличения расстояния R до них, которое определяется по значению красного космологического смещения (ККС)

$$z = v/c = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0, \quad (4)$$

где λ — длина волны, спектральной линии в излучении, приходящем от космического источника, λ_0 — длина волны той же линии, измеренная в спектре неподвижного лабораторного источника.

В уравнении (3) постоянная Хаббла $H \approx 75$ (км/с)/Мпк.

Звездные острова во Вселенной разбегаются вследствие импульса, полученного материей в момент Большого взрыва сверхплотного сгустка вещества, который произошел около 14 млрд лет назад. Чем больше значение ККС, тем выше скорость галактик и больше пройденный путь. Естественно, что при этом их светимость уменьшается (видимая звездная величина увеличивается). Эта зависимость отражена графически на рис. 3, где по оси абсцисс отложена видимая звездная величина, а по оси ординат $\lg cz$.

Самыми быстрыми объектами Вселенной являются квазары, открытые в 1960 г. К настоящему времени обнаружено уже более 5000 квазаров с ККС от $z=0,158$ до $z=7,1$. На диаграмме видно, что квазары бессистемно «взлетели» над прямой, характеризующей закон Хаббла. Согласно (3) квазары, имеющие $z > 1$, должны удаляться от нас со скоростями, превышающими скорость света. Что стоит за этим нарушением одного из основных положений СТО?

В те далекие шестидесятые, когда были открыты квазары, никто из ученых не мог предвидеть ускоренное расширение Вселенной. Поэтому астрофизиками была изобретена формула, математически сдерживающая скорость квазаров [7, с. 79]:

$$z = [(1+v/c)^{1/2} / (1-v/c)^{1/2}] - 1. \quad (5)$$

Ошибочность формулы (5) очевидна, так как в интервале ускоренного расширения Вселенной ($0 < n < 1$) вещество, в том числе квазары и фотоны света, должно двигаться по экспоненциальному закону, как показано на рис. 1, 2. Объяснение причины «сверхлётучести» квазаров (см. рис. 3) было дано в работе [8, с. 398], где доказано, что квазары движутся

с ускорением под действием реактивной силы, возникающей в результате одностороннего выброса релятивистской плазмы из их ядра. Ускоренным движением обладают и сверхновые звезды типа Ia, которые были использованы при открытии ускоренного расширения Вселенной [4]. Их ускорение вызвано направленным взрывом коллапсирующей звезды, движущейся с субсветовой скоростью.

Ускоренное движение далеких внегалактических объектов должно привести к заметному разрежению космической среды на окраинах Вселенной и увеличению скорости световых фотонов (1), (2). С учетом этого преобразуем формулу (4) следующим образом:

$$z=v/c=(c/n)/c=1/n. \quad (6)$$

На основании (6) запишем:

$$n=1/z. \quad (7)$$

Эта маленькая формула (7) имеет огромное значение для астрофизики и космологии, поскольку позволяет ученым по наблюдаемому значению ККС определить плотность космического вакуума в самых удаленных точках Вселенной!

С учетом (7) скорость движения вещества на этапе ускорения Вселенной (3), примет следующий вид:

$$v=cz=c/n. \quad (8)$$

Согласно (8) хорошо известный квазар 3C273 с $z=0,158$ удаляется от нас со скоростью $v=0,47367208 \cdot 10^8$ м/с, а скорость одного из самых быстрых квазаров PKS 2000-300 ($z= 3,78$) достигает $11,33215567 \cdot 10^8$ м/с. Это значение, превышающее скорость света c на

$8,33423109 \cdot 10^8$ м/с, не противоречит известному положению СТО, так как специальная теория относительности Эйнштейна описывает инерциальное движение тел в однородном и изотропном пространстве-времени, а формула (8) — движение тел в ускоренно расширяющейся Вселенной, которое происходит по экспоненциальному закону. Отметим, что скорость квазара PKS 2000-300 не превышает местной скорости света $u=c/n$, зависящей от плотности космического вакуума в районе движения квазара. Очевидно, что это правило касается всех тел, движущихся со скоростью $v>c$ в области ускоренного расширения Вселенной. Такой закон Природы!

Думаю, что дальнейшее дистанционное зондирование окраин Вселенной позволит ученым получить карту плотности космической среды в самых удаленных ее частях и предсказать финал Большого взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черепашук А.М., Черний А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. – Фрязино: ВЕК 2, 2004. – 320 с.
2. Нарликар Дж. Неистовая Вселенная. – М.: Мир, 1985. – 256 с.
3. Захаров В.Д. Тяготение. От Аристотеля до Эйнштейна. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 279 с.
4. Черний А.Н. О механизме ускоренного расширения Вселенной // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015, № 4. – С. 10–15.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1964. – 848 с.
6. Физика космоса. – М.: Советская энциклопедия, 1986. – 783 с.
7. Вильковиский Э.Я. Квазары и активность ядер галактик. – М.: Наука, 1985. – 174 с.
8. Черний А.Н. Релятивистская физика космоса. – М.: Научный мир, 2010. – 480 с.

Принято к печати 11 апреля 2016 г.
Рекомендована кафедрой фотограмметрии МИИГАиК

О ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЯХ ВНУТРИ ПРИТЯГИВАЮЩИХ МАСС

©2016 Н.Д. Дроздов

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

Аннотация. Указывается на совпадение геометрических характеристик гравитационного поля внутри притягивающих масс Земли, включая атмосферу, и гармонического продолжения её внешнего поля внутрь масс. В результате нарушения гармоничности поля внутри масс сказывается только на его динамических характеристиках. Неоднородность распределения плотностей масс нарушает регулярность изменения сил притяжения в гармоническом продолжении внешнего поля внутрь масс. Отсюда следует, что гравитационное поле внутри притягивающих масс не только не является гармоничным, но оно и не потенциально.

Ключевые слова: внешнее гравитационное поле, гравитационное поле внутри притягивающих масс, геометрические и динамические характеристики поля

GRAVITY FIELDS INSIDE ATTRACTION MASSES

©2016 Drozdov N.

The State University of Land Use Planning, Moscow, Russia

Abstract. It is shown coincidence of geometrical descriptions of the gravitational fields inside the Earth's attraction masses together its atmosphere and harmonious continuation of external field inside the masses. Consequently the breach in harmony of the field inside the masses affects its dynamic description only. Inhomogeneity of allocations in density of the masses disturbs the regularity of alteration powers density in harmonics continuation of external field inside the masses. As a result of this the gravity field inside the attraction masses is not potential.

Keywords: The external gravitational field, the gravitational field inside the attraction masses, geometrical and dynamic descriptions of the field

С незапамятных времён считалось, что гравитационные поля внутри притягивающих масс потенциальны. Так известное уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -4\pi\tau(M)$$

выражает дивергенцию гравитационного поля $\vec{\gamma}(M) = \frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k}$ внутри масс с плотностями $\tau(M)$ в каждой их точке M и с потенциалом $u=U(M)$.

Теории Стокса и Молоденского также полностью основаны на математической теории потенциала. И это полностью оправдано применительно к внешнему (вне притягивающих масс) гравитационному полю, где оно не только потенциально, но сверх того и гармонично. И тогда, исходя из предположения, что оно остаётся таким же и на поверхности Земли, с учётом также потенциальной центробежной силы вращения Земли вокруг своей оси, приращения потенциала $u=U(M)$ силы тяжести $\vec{g}(M)$ между двумя точками M_1 и M_2 на этой

поверхности должны, как известно, определяться контурными интегралами

$$\Delta U = \int_{M_1}^{M_2} g(M) dh(M),$$

где $g(M)$ — силы тяжести; $dh(M)$ — нивелирные превышения вдоль любого контура, соединяющего такие точки. Но фактически эти величины мы измеряем не во внешнем пространстве, а на поверхности Земли, т.е. на дне атмосферного океана в прямом контакте с земными массами и даже в маркшейдерии в шахтах и тоннелях, т.е. во всех случаях внутри притягивающих масс.

В гравистике [1] теория также внешнего гравитационного поля строится не на интегральной теории потенциала, а на более простой гамильтоновой дифференциальной теории гладких и не обязательно потенциальных полей. В ней доказано, во-первых, что внешнее гармоническое гравитационное поле Земли можно однозначно гармонически же продолжить внутрь притягивающих масс (теорема восстановления). Такое внешнее поле

вместе с его продолжением названо G -полем. Во-вторых, доказано, что при этом отношение $\delta(M)\gamma_G(M)$ должно оставаться постоянным в любой точке M той или иной изопотенциальной поверхности G -поля (центральная теорема гравитики). Здесь $\delta(M)$ — проекции радиус-векторов точек M относительно центра Земли на нормаль в этих точках к проходящим через них изопотенциальных поверхностей G -поля, а $\gamma_G(M)$ — сила притяжения G -поля в таких его точках.

Однако предпринятое А.К. Костиним использование этой теоремы со значениями $\gamma(M)$, полученными по фактическим измерениям на поверхности Земли показало, что величина такого отношения непостоянна и меняется вдоль горизонта весьма нерегулярно. Впрочем, такие нерегулярности динамических характеристик гравитационного поля Земли, часто имеющие вид реализаций случайных шумов, отмечаются разными специалистами уже достаточно давно. Это привело к известному направлению исследования таких нерегулярностей методами теории случайных процессов.

Но что порождает эти нерегулярности? Ведь если гравитационное поле Земли на её поверхности, т.е. внутри притягивающих масс, потенциально, то оно весьма гладко. Такая гладкость в геометрическом отношении наблюдается на практике хотя бы по величинам отклонений отвесных линий и их регулярных и незначительных изменений при последовательном перемещении от точки к точке. Никаких шумовых эффектов, подобных тем, какие имеют место в динамическом отношении при изменениях силы тяжести, не наблюдается. А между тем, если поле силы тяжести потенциально, то сами эти силы — это квадратные корни из значений модуля градиента такого поля. И если это поле регулярно, а силы тяжести меняются нерегулярно, то остаётся полагать, что это поле чем-то зашумлено, причём только по его динамическим, а не геометрическим характеристикам. Так что это за шум, чем он вызван и шум ли это?

Дифференциальная теоретико-полевая методика гравитики позволяет ответить на этот вопрос и извлечь из этого ответа определённые практические результаты. Но для этого необходимо напомнить некоторые математические

понятия и результаты и, главное, представить их в приспособленном для нашей цели виде.

О гладких скалярных полях. Здесь будем рассматривать только гладкие до нужной нам степени скалярные поля $u=U(M)$. Каждое такое поле характеризуется своей геометрией и своей значностью. Геометрию такого поля определяют его уровни, т.е. множества точек M трёхмерного пространства R_3 , в которых функция $u=U(M)$ принимает постоянное (неважно какое) значение. Эта геометрия гладкая, она представляет собой систему гладких поверхностей — *уровней* такого поля. Значность же поля определяется значениями функции на разных её уровнях.

Ясно, что на уровнях какого-либо одного скалярного поля со своими значениями на них можно задать и другие значения, т.е. получить другое скалярное поле с той же геометрией, но с другой значностью. Так что существует целое семейство разных скалярных полей с одинаковой геометрией, но разными значностями. Но при произвольном задании разных значений полей на разных его уровнях мы можем получить разные, в том числе негладкие, скалярные поля с одинаковой их геометрией. Но нас интересуют только гладкие поля с одинаковыми геометриями. Семейства таких полей в гравитике названы K -классами. Тогда все скалярные поля $u=U(M)$ того или иного K -класса, во-первых, имеют градиенты $\text{grad}U(M)$, т.е. порождают потенциальные векторные поля с соответствующими потенциалами $u=U(M)$ и, во-вторых, эти градиенты коллинеарны друг другу. Можно сказать, градиент какого либо одного поля $u=U_1(M)$ из данного K -класса коллинеарен градиентам любых других его полей $u=U(M)$, т.е.

$$\text{grad}U_1(M) = H(M)\text{grad}U(M). \quad (1)$$

При этом в любой K -класс будем включать лишь поля с одинаково ориентированными по их градиентам уровнями. Образно говоря, холмы и ямы поля с одинаковыми уровнями будем относить к разным K -классам. Это равносильно требованию $H(M)>0$ в (1). Но рассматриваемые поля $u=U_1(M)$ и $u=U(M)$ имеют общую геометрию, лишь если $U_1(M)=Q(U(M))$. При этом гладкость полей как $u=U_1(M)$, так и $u=U(M)$ необходимо требует, чтобы функция $Q(u)$ была

гладкой на множестве значений поля $u=U(M)$ и

$$\text{grad}U_1(M) = \frac{dQ(u)}{du} \text{grad}U(M).$$

Так что функция — коэффициент

$$H(M) = \frac{dQ(u)}{du} = G(U(M)) \quad (2)$$

в условии (1) не может быть произвольной функцией от M , а должен быть суперпозицией рассматриваемой функции $U(M)$ под знак той или иной первообразной от функции $Q(u)$. Причём для выполнения требования $(dQ(u)/u > 0)$ необходимо, чтобы функция $Q(u)$ была монотонно возрастающей.

Легко проверить, что и наоборот, если

$$\text{grad}U_1(M) = G(U(M)) \text{grad}U(M)$$

при $G(u) > 0$, то гладкие поля $U_1(M)$ и $U_2(M)$ принадлежат одному K -классу. В самом деле,

$$\begin{aligned} \text{grad}U_1(M) &= G(U(M)) \text{grad}U(M) = \\ &= \frac{dQ(u)}{du} \text{grad}U(M) = \\ &= \text{grad}Q(U(M)), \end{aligned}$$

где $Q(u)$ — та или иная первообразная от функции $G(M)$.

О векторных полях. Рассмотрим теперь произвольное гладкое векторное поле $\vec{F}(M)$. В той или иной координатной системе с ортонормированным базисом $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ точки M задаются координатами x, y, z , а само поле задаётся разложением

$$\vec{F}(x, y, z) = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k}$$

в этом базисе. Гладкость такого поля определяется гладкостью функций $P(M)$, $Q(M)$ и $R(M)$.

Известно, что через каждую точку $M(x, y, z)$ этого поля проходит единственная гладкая его *векторная линия*, касательные к которой в любой её точке являются линией действия векторов $\vec{F}(M)$ поля в такой точке. Эти линии определяются теми или иными независимыми и гладкими первыми интегралами

$$\begin{cases} v = V(x, y, z) = V(M) \\ \omega = W(x, y, z) = W(M) \end{cases} \quad (3)$$

системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{P(x, y, z)} = \frac{dy}{Q(x, y, z)} = \frac{dz}{R(x, y, z)}.$$

В любой фиксированной точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ функции (3) принимают значения $v_0 = V(M_0)$ и $w_0 = W(M_0)$ и с ними в левых частях равенств (3) они становятся уравнениями двух всюду пересекающихся поверхностей. Система же (3) при v_0 и w_0 определяет линию их пересечения. Она и является векторной линией, проходящей через точку M_0 . Эти линии естественно ориентировать по направлениям векторов поля. В силовых полях так ориентированные векторные линии называют обычно *силовыми линиями*, а в гидродинамических полях — *линиями тока*.

Отсюда ясно, что для векторных линий выполняются тождественные равенства нулю скалярных произведений

$$(\vec{F}(M) \text{grad}V(M)) \equiv (\vec{F}(M) \text{grad}W(M)) \equiv 0. \quad (4)$$

Но в такой ситуации через любую точку M поля можно провести единственную гладкую поверхность, которая в каждой своей точке перпендикулярна проходящей через неё векторной линии. Это *поверхности горизонта* или просто *горизонты* данного векторного поля. Эти горизонты также естественно ориентированы векторами $\vec{F}(M)$ нашего поля. Тогда, согласно теории о гладких скалярных полях, все они порождают K -класс гладких скалярных полей, задаваемых функциями $u = U(x, y, z) = U(M)$, называемыми функциями горизонтов. Ясно, что их градиенты $\text{grad}U(M)$ всюду коллинеарны и равнонаправлены с векторами $\vec{F}(M)$ поля в каждой его точке M , т.е.

$$\vec{F}(M) = H(M) \text{grad}U(M), \quad (5)$$

где $H(M) > 0$ или, согласно (4),

$$\begin{aligned} (\text{grad}U(M) \text{grad}V(M)) &\equiv \\ \equiv (\text{grad}(U(M) \text{grad}W(M)) &\equiv 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Такой K -класс скалярных полей наряду с системой векторных линий характеризует геометрию данного векторного поля $\vec{F}(M)$.

Но формула (5) показывает, что эту же геометрию имеют разные векторные поля, отвечающие в этой формуле разным функциям-коэффициентам $H(M)$. Так что одну и ту же геометрию, определяемую заданным K -классом гладких скалярных полей, имеет целый класс векторных полей. При этом ясно, что поле $\vec{F}(M)$ будет потенциальным только тогда,

когда функция-коэффициент $H(M)$ в формуле (5) также принадлежит K -классу, определяющему его геометрию, т.е. когда

$$H(M) = Q(\bar{U}(M)), \quad (7)$$

где $\bar{U}(M)$ — одна из функций этого K -класса, а $Q(u)$ — произвольная гладкая монотонно возрастающая функция.

Условие (7) означает, что значения функций-коэффициентов $H(M)$ в формуле (5) остаются постоянными на любых уровнях скалярного поля $\bar{U}(M)$. В противном случае, когда функция $H(M)$ не принимает постоянное значение хотя бы на некоторых из этих уровней, отвечающее ей по формуле (5) векторное поле $\vec{F}(M)$ в целом, т.е. на всём множестве его определения, не является потенциальным.

Разумеется, функция $H(M)$ может быть такой, что на каком-то массиве данной геометрии или даже континуальных частей этих уровней она удовлетворяет условию (7) и тогда на этом массиве отвечающее ей поле $\vec{F}(M)$ потенциально, а всюду вне этого массива, где функция $H(M)$ не удовлетворяет условию (7), поле $\vec{F}(M)$ непотенциально.

Основная тема. Обратимся теперь к рассмотрению общеземного, т.е. определённого как вне, так и внутри притягивающих масс, гравитационного поля $\vec{\gamma}(M)$ сил притяжения. Согласно рассуждениям о векторных полях, геометрия этого поля всюду в нём определена системой его гладких горизонтов и отвесных (силовых) линий, однозначно проходящих через любую его точку M . Согласно же теории о гладких скалярных полях, на этой системе горизонтов можно задать целый K -класс гладких скалярных полей. Любое из них определяет потенциальное векторное поле их градиентов, коллинеарных и равнонаправленных с векторами реального поля $\vec{\gamma}(M)$. Так что геометрию реального поля можно представить каким угодно одним из таких потенциальных полей. Но конкретно на Земле её внешнее поле сил притяжения само является потенциальным и даже, сверх того, гармоническим с потенциалом $u=U(M)$. Только определён этот потенциал лишь вне притягивающих масс. Однако его опять-таки можно как угодно гладким образом продолжить внутрь масс. И любое такое потенциальное продолжение внешнего поля внутрь

масс будет представлять там геометрию реального поля.

Между тем в гравистике [1] доказано (теорема восстановления), что это внешнее гармоническое поле Земли имеет единственное гармоническое продолжение внешнего поля внутрь притягивающих масс. Как видим, это следует понимать так, что речь идёт о гармоническом продолжении лишь значений функции $u=U(M)$ внешнего поля на все внутренние горизонты общеземного поля. Гармоническое поле с таким потенциалом $u=U(M)$, определённым как вне, так и внутри притягивающих масс, в гравистике названо G -полем. Так что геометрию общеземного поля $\vec{\gamma}(M)$ можно представить не только разными потенциальными полями, но и единственным из них гармоническим G -полем. Это означает, что геометрия эта гармоническая. Согласно теореме восстановления [1], все её горизонты являются аналитическими, сверхгладкими поверхностями, а отвесные (силовые) линии — аналитическими линиями. Это подтверждается практически как уже упомянутой регулярностью изменений отклонений отвеса на земной поверхности, так и практикой глубинного бурения скважин или маркшейдерских работ в шахтах и горных или просто подземных тоннелях.

Следует по достоинству оценить этот замечательный феномен природы гравитационных полей. Его следствием, в частности, является то, что вся геометрическая часть общеземного поля, составляющая предмет собственно геодезии, включая маркшейдерию, полностью определяются G -полем, определённым во всём пространстве, где определено общеземное поле $\vec{\gamma}(M)$.

Но согласно (5) это позволяет дать полное описание общеземного поля формулой

$$\vec{\gamma}(M) = H(M) \text{grad} U(M), \quad (8)$$

где вне притягивающих масс, т.е. при $M \in D$, функция-коэффициент $H(M) \equiv 1$ и в этой области $\vec{\gamma}(M) = \vec{\gamma}_E(M) = \text{grad} U(M)$. А из вышесказанного ясно, что внутри притягивающих масс, т.е. при $M \in \bar{D}$, поле $\vec{\gamma}(M)$ было бы потенциально лишь при условии $H(M) \equiv Q(U(M))$, т.е. когда функция $H(M)$ принимает постоянные значения на любом уровне функции $u=U(M)$.

Но согласно (8) функция $H(M)$ определяется

формулой

$$H(M) = \frac{\gamma(M)}{\gamma_G(M)}, \quad (9)$$

где силы $\gamma(M)$ в реальном поле измеряемы, а силы $\gamma_G(M) = \text{grad}U(M)$ в G -поле могут быть вычислены по координатам точек M . При этом по доказанной в гравистике аналитичности функции $u=U(M)$ силы $\gamma_G(M)$ меняются, в частности вдоль её уровней, весьма регулярно. Измеряемые же силы $\gamma(M)$, как уже отмечено выше, в области \bar{D} притягивающих масс, включая атмосферу, такой регулярности не проявляют.

Так что второй существенный для осознания вывод состоит в том, что на Земле в области \bar{D} , заполненной притягивающими массами, поле $\bar{\gamma}(M)$ сил притяжения, заведомо не будучи гармоническим, не является также и потенциальным. Этот вывод, в частности, ставит вопрос о степени правомерности использования результатов измерений динамических характеристик земного поля в формулах, полученных теоретически применительно к условиям гармонического внешнего гравитационного поля Земли. А таковыми являются все теории, начиная от Стокса и Молоденского и до гравистики. Все они априори считают возможным пренебречь влиянием внешних масс по отношению к собственному телу Земли, включая атмосферные массы.

Но мы ещё не выяснили природу нерегулярности изменения сил внутри притягивающих масс. Рассмотрим этот вопрос.

Как известно, $\text{div} \bar{\gamma}(M) = -4\pi\tau(M)$ независимо от того, является или не является поле $\bar{\gamma}(M)$ потенциальным, как это заведомо принято в уравнении Пуассона. Напомним, что $\tau(M)$ — это плотность притягивающих масс в точках M . А поскольку в точках $M \in D$ таких масс нет, т.е. в них $\tau(M) \equiv 0$, то в них и $\text{div} \bar{\gamma}_E(M) \equiv \text{div} \text{grad}U(M) \equiv 0$. Это и есть условие гармоничности как внешнего поля, так и всего G -поля. В точках же $M \in \bar{D}$, где $\tau(M) \neq 0$, поле $\bar{\gamma}(M) = \bar{\gamma}_1(M)$ гармоническим заведомо не является и к тому же, как видим, оно не обязано быть потенциальным. При этом по дифференциальным свойствам векторных полей с учётом (8) имеем

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}(M) &= \text{div}(H(M) \text{grad}U(M)) = \\ &= H(M) \text{div} \text{grad}U(M) + \\ &+ (\text{grad}H(M) \text{grad}U(M)). \end{aligned}$$

Но с учётом (3) можно записать $H(M) = H(U(M), V(M), W(M))$ и тогда

$$\begin{aligned} \text{grad}H(M) &= \frac{\partial H}{\partial u} \text{grad}U(M) + \\ &+ \frac{\partial H}{\partial v} \text{grad}V(M) + \\ &+ \frac{\partial H}{\partial w} \text{grad}W(M). \end{aligned}$$

Теперь с учётом того, что

$$\text{div} \bar{\gamma}(M) = -4\pi\tau(M),$$

а $\text{div} \text{grad}U(M) = \text{div} \bar{\gamma}_G(M) = 0$, формула (10) принимает вид

$$-4\pi\tau(M) = \frac{\partial H}{\partial u} \gamma_G^2(M).$$

Но известно, что $\gamma_G(M) = |\text{grad}U(M)| = \frac{\partial U(M)}{\partial h}$ — это скорость изменения значений функции $u=U(M)$ при перемещении dh вдоль силовой линии G -поля, проходящей через точку M . При этом $\frac{\partial H(M)}{\partial u} \frac{\partial U(M)}{\partial h} = \frac{\partial H(M)}{\partial h}$ и в результате можно записать, что

$$-4\pi\tau(M) = \frac{\partial H(M)}{\partial h} \gamma_G(M). \quad (11)$$

Эта формула совместно с формулой (9) указывает на прямую связь нерегулярности изменений сил $\gamma(M)$ притяжения по тем или иным горизонтам поля $\bar{\gamma}(M)$ с нерегулярностью распределения плотностей $\tau(M)$ притягивающих масс по этим горизонтам. При этом поскольку формула (9) позволяет практически получать значения функции $H(M)$ в тех или иных точках M , то формула (11) позволяет определить значения плотности $\tau(M)$ в этих точках по скорости $\frac{\partial H(M)}{\partial h}$ изменения значений функции $H(M)$ вдоль соответствующих силовых линий этого поля. Эту скорость также можно получить практически. Связь (11) показывает также, что при стабильном распределении плотностей $\tau(M)$ притягивающих масс нерегулярность изменения сил $\gamma(M)$, строго говоря, не представляет собой реализацию случайного процесса. Но в текучих притягивающих массах (атмосфера, океан, районы с неустойчивой

тектоникой) есть основания говорить о случайном характере такой нерегулярности.

В заключение считаю своим обязательным долгом отметить, что вопросы, приведшие к изложенным выводам и результатам, могли возникнуть у меня только благодаря тесному научному общению с А.К. Костиным и, соответственно, знакомству с его настойчивой и

кропотливой работой, приводящей его к устойчивому недоверию к справедливости основной теоремы гравистики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Н.Д. Гравистика. М.: РИО ГУЗ, 2008.

Принята к печати 28 марта 2016 г.

СОВРЕМЕННЫЕ ЗАРУБЕЖНЫЕ ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ГЕОИДА В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ РАЙОНАХ

©2016 М.В. Абакушина, В.Б. Непоклонов, В.С. Моисеева

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

vbnep@miigaik.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу современного состояния работ в области построения региональных и национальных цифровых моделей геоида на зарубежные территории по гравиметрическим данным. Рассмотрены 4 региональные модели геоида континентального масштаба (Европа, Африка, Южная Америка, Австралия) и 7 аналогичных национальных моделей на районы значительной протяженности (США, Канада, Мексика, Китай, Монголия, Казахстан, Украина). Также представлен анализ состояния дел с определением геоида в Антарктиде. В ходе анализа учитывались исходные данные, методика получения конкретной модели, ее состав, разрешающая способность и точностные характеристики. Показано, что разрешающая способность современных региональных и национальных моделей геоида варьируется от 5' до 1–2', в зависимости от полноты и качества исходной гравиметрической информации. В той же мере варьируются и точностные характеристики моделей, от нескольких дециметров до нескольких сантиметров. Учет зарубежного опыта целесообразен при создании аналогичных моделей для территории России.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, высота геоида, модель, гравиметрическая информация, спутниковое нивелирование, точностные характеристики

MODERN FOREIGN DIGITAL GEOID MODELS IN CONTINENTAL AREAS

©2016 Abakushina M., Nepoklonov V., Moiseeva V.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

vbnep@miigaik.ru

Abstract. The aim of the article is to analyze the current state of work in a field of regional and national digital geoid models for overseas territories using gravity data. Four regional models (Europe, Africa, South America, Australia) and 7 national geoid models (USA, Canada, Mexico, China, Mongolia, Kazakhstan, Ukraine) are considered. Also, analysis of current situation in a definition of geoid in Antarctica is represented. It is shown that the resolution of modern regional and national geoid models is ranging from 5 to 1-2 arc minutes. It depends on the completeness and quality of initial gravimetric data. Precision characteristics of the models vary from a few centimeters to a few decimeters. To create similar models for the territory of Russia it is appropriate to take into account foreign experience.

Keywords: Earth's gravitational field, the height of the geoid, model, the gravimetric data, satellite (GPS) leveling, accuracy characteristics

В настоящее время одной из актуальных задач геодезии является создание высокоточных моделей геоида на суше. Такие модели нужны как для решения ряда научных задач, так и для практических целей, в частности, для замены геометрического нивелирования, трудоемкого и дорогостоящего, высокопроизводительным

спутниковым нивелированием. Суть технологии спутникового нивелирования заключается в определении абсолютных (ортометрических/ нормальных) высот как разностей геодезических высот, получаемых по спутниковым измерениям, и высот геоида (ВГ)/высот квази геоида (ВКГ), вычисляемых по модели [1].

Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» предусмотрено повышение к 2020 г. точности определения ВКГ на территории Российской Федерации до уровня, характеризуемого погрешностью 0,05 м [2]. Создание моделей геоида такой высокой точности является сложной научно-технической задачей, выполнению которой может способствовать учет опыта решения аналогичных задач за рубежом. Исходя из этого, в настоящей статье представлен общий анализ достигнутого уровня зарубежных региональных и национальных моделей геоида на континентальные районы, отчасти как продолжение и развитие ранее выполненных исследований такого рода [3]. В отечественных публикациях подобный анализ ранее не проводился.

В данной работе под региональными моделями понимаются модели, область действия которых имеет континентальный (субконтинентальный) уровень, охватывает, как правило, территории нескольких стран. Соответственно, под национальными моделями понимаются модели, область действия которых, как правило, ограничена территориями отдельных государств. Наиболее распространенной на сегодняшний день разновидностью таких моделей — цифровые модели (карты) геоида (ЦМГ) в виде совокупности дискретных значений ВГ (ВКГ) в узлах равномерной сетки меридианов и параллелей [1].

В общем случае технологический процесс создания современных ЦМГ сводится к уточнению и детализации глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) в конкретных районах и состоит из двух основных этапов (стадий). Сначала осуществляется создание ЦМГ с использованием детальной гравиметрической информации, дополняемой при необходимости цифровыми моделями рельефа (ЦМР), а также данными спутниковой альтиметрии (в прилегающих акваториях Мирового океана). Получаемые модели принято называть гравиметрическими. Для контроля используются ВГ (ВКГ), полученные по схеме обратного спутникового нивелирования (ОСН) — как разности геодезических (спутниковых) и абсолютных (нивелирных) высот (далее — данные ОСН). Затем, в случае необходимости,

выполняется уравнивание ЦМГ с данными ОСН. В результате на основе гравиметрической модели формируется так называемая комбинированная или гибридная модель геоида. Настоящая статья посвящена анализу состояния дел преимущественно в области создания гравиметрических моделей.

Точностные характеристики региональных и национальных ЦМГ на зарубежные территории в значительной мере зависят от изученности этих территорий в гравиметрическом и геодезическом отношении. В настоящее время ее состояние продолжает оставаться неравномерным. К регионам, относительно хорошо обеспеченным исходной гравиметрической и геодезической информацией, можно отнести территории Европы, Северной Америки, Австралии. В отличие от этого, значительная часть районов, расположенных на территории Азии, Африки, Южной Америки, Антарктиды, по-прежнему не имеет покрытия гравиметрическими съемками требуемой точности, полноты и подробности.

Региональные (в принятом смысле) ЦМГ на сегодняшний день созданы для территорий Европы, Южной Америки, Австралии и Африки. Рассмотрим последние версии этих моделей, придерживаясь следующей примерной схемы анализа: наименование (обозначение); исходные данные; методика получения; состав, разрешающая способность и точностные характеристики.

Основная на сегодняшний день региональная модель геоида для Европы — «Европейский гравиметрический геоид 2007 года» (EGG07). Область действия включает европейскую часть России. Данная модель создана в результате реализации Европейского проекта по гравиметрии и изучению геоида (EGGP). Представляет собой массив ВГ и ВКГ на сетке $1' \times 1,5'$, вычисленных с использованием глобальной модели геопотенциала EIGEN-GLO4C, всех доступных на 2007 г. детальных гравиметрических и гипсометрических данных на территорию Европы. Расчеты выполнялись на базе использования техники «исключения-восстановления» с введением в остаточные АСТ редуцированных поправок за рельеф и преобразованием их в ВГ в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). По результа-

там тестирования, точность данной модели в континентальном масштабе характеризуется среднеквадратической погрешностью (СКП) 0,03–0,05 м. По сравнению с предшествующей версией модели геоида на территорию Европы (EGG97) точностные характеристики улучшены на 25–65% [4]. В некоторых европейских странах модель EGG07 существенно превосходит по точностным характеристикам практически одновременно созданную в США глобальную ультравысокостепенную модель геопотенциала EGM2008 [3].

Это стало возможным за счет, в том числе, использования новых гравиметрических данных на территории ряда европейских стран (Австрия, Бельгия, Германия, Дания, Испания, Италия, Нидерланды, Турция, Франция и др.), повышения точности определения АСТ в акваториях окружающих морей по данным спутниковой альтиметрии, выполнения Арктического гравитационного проекта ArcGP [5].

Новая региональная модель геоида для Южной Америки, GEOID2014, представляет собой массив ВГ на сетке $5' \times 5'$, полученных с использованием глобальной модели геопотенциала EIGEN-6C3stat (до 200-й степени), измеренных значений силы тяжести более чем в 892 тыс. гравиметрических пунктах, альтиметрических АСТ на сетке $1' \times 1'$ в прибрежных акваториях (по данным каталога DNSC10) и детальной ЦМР. Высоты геоида в ближней зоне вычислены по интегральной формуле Стокса в варианте с модифицированным ядром Молоденского–Мейселя при помощи БПФ. Невязка модели

GEOID2014 с данными ОСН (около 1,8 тыс. контрольных нивелирных пунктов) характеризуется граничными значениями $-2,55$ м и $2,24$ м, средним значением $0,17$ м и стандартным отклонением $0,52$ м. Сравнение с аналогичными оценками предшествующей версии рассматриваемой модели, датируемой 2010 г. (граничные значения $-2,35$ и $3,95$ м; среднее значение $0,23$ м; стандартное отклонение $0,72$ м) показывает, что точность определения геоида на значительной части территории Южной Америки повысилась примерно на 25% [6, 7].

Региональная модель геоида для Африки AGP2007 получена в рамках реализации про-

екта «Африканский геоид» (African Geoid Project). Данная модель представляет собой массив ВГ на сетке $5' \times 5'$, вычисленных с использованием глобальной модели геопотенциала EIGEN-GL04C (до 120-й степени), гравиметрических АСТ по трапециям $5' \times 5'$ на суше, альтиметрических АСТ на сетке $2' \times 2'$ в прибрежных акваториях (по данным каталога KMS02) и цифровой модели рельефа SRTM30. Расчеты выполнялись по схеме «исключения-восстановления» с введением в исходные АСТ поправки Молоденского в первом приближении. Отличие модели AGP2007 от предшествующей версии (AGP2003) характеризуется стандартным отклонением $0,67$ м. Невязка с данными ОСН характеризуется следующими стандартными отклонениями: $0,26$ м в северной части Африки; $0,17$ м в Южной Африке. Расхождения с глобальной гравитационной моделью EGM2008 до 2190-й степени лежат в диапазоне от $-4,58$ до $6,31$ м при среднем значении $0,02$ м и стандартном отклонении $0,73$ м [8].

Региональная модель геоида для Австралии AUSGeoid09 одновременно является национальной моделью геоида для материковой части австралийского государства. Представляет собой массив ВКГ на сетке $1' \times 1'$, вычисленных с использованием глобальной модели геопотенциала EGM2008 до 2190-й степени, около 1,4 млн значений АСТ в пунктах наземной гравиметрической съемки, альтиметрических АСТ на сетке $1' \times 1'$ (по данным каталога DNSC2008) в окружающих акваториях и цифровой модели высот рельефа на территорию Австралии GEODATA-DEM9S на сетке $9'' \times 9''$. Расчеты выполнялись на основе так называемого гибридного метода «удаления-восстановления» с модифицированным ядром Стокса (до 40-й степени) в комбинации с алгоритмом одномерного БПФ на сфере. Цифровая модель рельефа использовалась при усреднении исходных АСТ, а также при расчете топографических поправок. В результате точность определения гравиметрических ВКГ по сравнению с предшествующей моделью (AUSGeoid98), как показало сравнение данными ОСН в 6672 нивелирных пунктах, была повышена более чем в 5 раз. Уравнивание гравиметрических и спутниковых ВКГ выполнялось по методу

статистической коллокации в адаптивном варианте. По результатам уравнивания точность модели AUSGeoid09 по территории Австралии характеризуется СКП 0,03 м [9, 10].

Следует отметить также, что в настоящее время реализуется Антарктический гравитационный проект (AntGG). Работы проводятся под эгидой Международной геодезической ассоциации (IAG). Конечной целью данного проекта является создание модели геоида на территорию Антарктиды с улучшенными точностными характеристиками, предназначенной, в числе прочего, для валидации современных глобальных моделей геопотенциала. Для достижения этой цели предполагается использование данных аэрогравиметрических измерений и спутникового нивелирования [11]. На сегодняшний день в рамках реализации проекта AntGG подготовлен сводный каталог гравиметрических данных по 13 млн пунктов на территорию площадью 10 млн км², что составляет около 73% общей площади континента. Эти данные пересчитаны на сетку с шагом 10 км в виде аномалий Буге и аномалий в свободном воздухе [12]. С использованием имеющейся гравиметрической, гипсометрической и криометрической информации созданы локальные модели геоида (квазигеоида) на ряд районов Антарктиды [13, 14]. Достигнутая точность определения высот геоида по данным этих моделей характеризуется СКП 0,15 м и выше.

В настоящее время региональные модели геоида используются в основном в научных целях. В геодезической практике более широкое распространение имеют модели, создаваемые в рамках национальных проектов. На сегодняшний день многие государства мира имеют собственные модели геоида на свои территории. Повышенный интерес вызывают национальные модели для государств с большой территорией, в первую очередь, те, которые условно можно отнести к категории субрегиональных моделей, а также модели для крупных государств, граничащих с Российской Федерацией. В число указанных моделей входят модели геоида на территории таких стран как США, Канада, Мексика, Китай, Казахстан, Монголия, Украина.

США. Последние достижения в области изучения гравиметрического геоида на тер-

ритории континентальной части США, включая Аляску, реализованы в виде ЦМГ «U.S. Gravimetric Geoid 2012» (USGG2012), получившей статус новой национальной модели гравиметрического геоида. Модель USGG2012 является продолжением серии аналогичных моделей, созданных в предшествующие годы (USGG2009, USGG2003 и др.). Данная модель представляет собой массив ВГ над общеземным эллипсоидом GRS80 на сетке 1'×1' в границах 24...58° с.ш. и 60...130° з.д. Получена с использованием следующей исходной информации: глобальной модели геопотенциала EGM2008 до 2160-й степени, уточненной в низкочастотной части с использованием новой спутниковой модели GOCO02S; более 2 млн наземных и морских (судовых) измерений силы тяжести; альтиметрических АСТ (1'×1') в прилегающих акваториях Мирового океана (по данным каталога DSNC2010); ЦМР (3"×3") на территории США, Канады, Мексики (по данным Shuttle Radar Topography Mission – SRTM). Методика создания модели USGG2012, как и ее предшествующей версии USGG2009, базировалась на использовании схемы «удаления-восстановления» относительно модели EGM2008. Остаточные АСТ с введенными в них поправками за рельеф, рассчитанными по ЦМР, преобразовывались в ВГ по интегральной формуле Стокса с модифицированным ядром (до 120-й степени, на территории Аляски — до 360-й степени). По априорным оценкам, погрешность модели USGG2012 не превышает 2,5–3 см (с вероятностью 95%). Сравнение модели USGG2012 с данными ОСН (более чем в 18 тыс. нивелирных пунктах на территории США), показало, что среднее отклонение составляет около –0,01 м, а стандартное отклонение не превышает 0,06 м, что примерно на 10% лучше аналогичного показателя модели EGM2008 [15, 16].

Канада. Лучшей на сегодняшний день национальной моделью гравиметрического геоида для территории Канады является модель «Canadian gravimetric geoid 2013» (CGG2013). Данная модель представляет собой массив ВГ на сетке 2'×2' в границах 10...90° с.ш., 10...170° з.д. Создана с использованием следующей исходной информации: комбинации двух глобальных моделей геопотенциала —

низкочастотной спутниковой модели, основанной на данных космического аппарата GOCE, и высокочастотной комбинированной модели EIGEN-6C3stat до 1949-й степени (в предшествующей версии модели, CGG2010, использовалась комбинация моделей GOCO01S и EGM2008); данных наземных и морских гравиметрических съемок и альтиметрических АСТ, в том числе данных Арктического гравитационного проекта ArcGP; новой ЦМР на территорию Канады (CDED) масштаба 1:50 000. Методика создания модели базировалась на комплексировании техники «удаления-восстановления» и метода Стокса-Гельмерта с модифицированным ядром (до 120-й степени, при радиусе ближней зоны 3°). Данную методику вычисления ВГ, разработанную в Университете Нью-Брунсвика (UNB) Канада и теоретически обеспечивающую сантиметровой уровень точности, принято называть методикой UNB [17]. Точность модели CGG2013 на большей части территории Канады (около 80%) характеризуется среднеквадратической погрешностью (СКП) 0,03 м. В остальных районах (как правило, это районы повышенной гравиметрической и/или гипсометрической аномальности) модели приписан дециметровый уровень точности. Разности ВГ на базе 100 км характеризуются сантиметровыми погрешностями. Расхождения модельных ВГ с данными ОСН оцениваются средним значением $-0,19$ м и стандартным отклонением 0,13 м. Отклонения канадской модели CGG2013 от американской модели USGG2012 в зоне перекрытия характеризуются следующими статистиками: граничными значениями $-0,66$ и $0,76$ м, средним значением $-0,03$ м, стандартным отклонением 0,03 м [18].

Мексика. В качестве официальной национальной модели гравиметрического геоида для территории Мексики используется модель Mexican Gravimetric Geoid 2005 (GGM05) [19]. Данная модель представляет собой массив ВГ на сетке $2,5' \times 2,5'$ в границах $14...33^\circ$ с.ш., $86...119^\circ$ в.д. Создана с использованием следующей исходной информации: глобальной модели геопотенциала EIGEN2 (до 140-й степени); гравиметрических АСТ по трапециям $2,5' \times 2,5'$, полученных по данным 527371 наземных гравиметрических пунктов; альтиме-

трических АСТ соответствующей детальности в окружающей акватории Мирового океана, общим числом 788556; цифровой модели рельефа. Для заполнения «белых пятен» в исходной гравиметрической информации использовалась модель EGM96 до 360-й степени. Технология вычисления ВГ базировалась на использовании упомянутой выше методики UNB. Модель GGM05 оценивалась по результатам сравнения с данными ОСН в 1377 контрольных нивелирных пунктах на территории Мексики. Полученные расхождения лежат в границах от -2 до $1,5$ м при стандартном отклонении, которое, судя по карте, приведенной в [19], можно оценить на уровне 0,2 м.

Китай. Современная национальная модель гравиметрического геоида для территории Китая — это модель Chinese National Gravimetric quasi-Geoid 2011 (CNGG2011). Данная модель представляет собой массив ВГ на сетке $2' \times 2'$, вычисленных с использованием глобальной модели геопотенциала EIGEN-CG03C, цифровой модели АСТ с шагом $2'$, полученной более чем по одному миллиону измерений силы тяжести на суше, а также цифровой модели рельефа на сетке $7,5'' \times 7,5''$, созданной по информации SRTM. Расчеты выполнялись с использованием метода Стокса-Гельмерта. Модель CNGG2011 оценивалась путем сравнения с данными ОСН в 649 контрольных нивелирных пунктах. Полученные расхождения характеризуются граничными значениями $-0,58$ и $0,41$ м, средним значением $-0,16$ м и стандартным отклонением 0,13 м (для пунктов, расположенных в Тибете — $0,22$ м). В целом точность модели CNGG2011 оценена СКП на уровне 0,07 м в восточной части и 0,14 м в западной части страны [20].

Казахстан. Достигнутый уровень изучения геоида на территории Казахстана по гравиметрическим данным отражает модель KazGM2010. Данная модель представляет собой массив ВГ на сетке $5' \times 5'$ в границах $40...56^\circ$ с.ш., $46...88^\circ$ в.д. В качестве исходной информации для ее создания использовались: опорная глобальная модель геопотенциала ITG-GRACE2010S до 180-й степени; аномалии Буге на сетке $5' \times 5'$, полученные в результате оцифровки гравиметрических карт масштаба 1:1 000 000 (погрешность около 3 мГал); ЦМР

(3"×3") для Казахстана по данным SRTM-съемки (погрешность около 20 м). Методика создания модели включала в себя пересчет исходных аномалий Буге в аномалии в свободном воздухе с использованием ЦМР; преобразование АСТ в ВГ по модифицированной формуле Стокса с дополнительной коррекцией (радиус ближней зоны 3°), на основе метода, разработанного в Стокгольмском королевском технологическом институте (КТН) [21]. Метод КТН нацелен на всемерное уменьшение в интегральном квадратичном смысле влияния на результат вычислений погрешностей исходной гравиметрической информации, погрешностей определения исходных гармонических коэффициентов геопотенциала и погрешностей усечения опорной модели АГПЗ. Дополнительная коррекция аддитивно включает в себя поправки в ВГ за влияние рельефа, атмосферы и эллипсоидальности Земли. В последние годы этот метод успешно использовался для создания национальных моделей геоида в ряде стран (Новая Зеландия, Иран, Швеция, Танзания, Греция и др.). Точность модели KazGM2010 в целом оценивается СКП около 0,10 м. Расхождения модели с данными ОСН (в 20 нивелирных пунктах) характеризуются граничными значениями –0,30 и 0,33 м и стандартным отклонением 0,18 м. При этом погрешность определения приращений ВГ в среднем составляет 1,2 мм/км (в диапазоне от 15 до 1630 км) [22].

Монголия. Современные достижения в области изучения геоида на территории Монголии реализованы в национальной модели гравиметрического геоида 2007 г. Данная модель представляет собой сдвоенный массив ВГ и ВКГ на сетке 5'×5' (предположительно), полученный на основе комбинации двух глобальных моделей геопотенциала — EGM96 (до 360-й степени) и новой спутниковой модели GGM02S (до 160-й степени), полученной по измерительной информации системы GRACE. Использование модели GGM02S обуславливалось целесообразностью повышения точности учета низкочастотной части геопотенциала. Детализация глобальной модели на территории Монголии обеспечивалась использованием различных видов гравиметрической информации, в том числе измерений силы тяжести на пунктах государственной гравиметрической сети, абсолютных

измерений силы тяжести (2006–2007 гг.), материалов наземных гравиметрических съемок, выполненных в период 1970–2005 гг., а также данных аэрогравиметрических съемок территории Монголии, выполненных в период 2004–2005 гг. Аэрогравиметрические съемки выполнялись при участии Национального центра космических исследований Дании (DNSC) в кооперации с Национальным управлением геопрограммной разведки США (NGA) и Университетом Бергена (Норвегия). В качестве источника высотной информации использовалась ЦМР (3"×3") для Монголии по данным SRTM-съемки). Методика создания модели предусматривала пересчет АСТ в ВГ (ВКГ) по схеме «удаления-восстановления» в сочетании с использованием для вычисления интеграла Стокса в ближней зоне алгоритма БПФ на сфере. Точность созданной модели в целом оценивается СКП около 0,16 м. Расхождения модели с данными ОСН (58 контрольных пунктов) характеризуются средним значением –1,14 м и стандартным отклонением 0,20 м. Работы по созданию модели координировались Национальным управлением земельных отношений, геодезии и картографии Монголии [23].

Украина. На сегодняшний день на территорию Украины создана ЦМГ высокого разрешения Ukrainian Gravimetric Geoid 2013 (UGG2013) в виде массива ВГ на регулярной сетке 1,5'×1,5' в границах 44...53° с.ш., 22...41° в.д. с числом узлов 361×761. В качестве исходной информации использовались: глобальная модель геопотенциала EGM2008; 2605 точечных значений АСТ для определяемой области из базы данных Международного гравиметрического бюро (из них 1213 на суше, 1392 на море); ЦМР (3"×3") для территории Украины по данным SRTM-съемки. Методика получения модели UGG2013 предусматривала пересчет АСТ на регулярную сетку с учетом влияния рельефа; преобразование сеточных АСТ в ВГ по схеме «удаления-восстановления» на основе модели EGM2008 до 360-й степени с вычислением интеграла Стокса по формуле свертки в частотной области. Точность полученной модели, по результатам ее сравнения с независимыми значениями ВГ в пунктах Европейской высотной сети (EUVN) на территории Украины, оценивается СКП около 0,10 м.

Работы по созданию и тестированию модели UGG2013 выполнялись в Высшей политехнической школе Государственного университета Альмерии (Испания) [24].

Таким образом, в данной работе проведен унифицированный анализ результатов реализации ряда проектов по созданию современных региональных и национальных моделей геоида на зарубежные территории. На основании проведенного анализа могут быть сделаны следующие основные выводы.

В ходе исследования рассмотрены четыре региональные модели (Европа, Африка, Южная Америка, Австралия) и семь национальных моделей геоида (США, Канада, Мексика, Китай, Монголия, Казахстан, Украина). Также представлен анализ современного состояния работ по определению геоида в Антарктиде. Все указанные модели датируются периодом 2005–2013 гг. Их создание, как правило, было направлено на повышение точности и детальности ЦМГ в национальных и(или) континентальных масштабах по сравнению моделями, созданными в прежние годы. Активизация работ по созданию новых ЦМГ в указанный период обуславливалась следующими факторами: все более широким внедрением спутниковых технологий решения геодезических задач, в первую очередь, спутникового нивелирования; повышением точности и разрешающей способности глобальных моделей геопотенциала с использованием новых данных космической геодезии (спутниковая альтиметрия, межспутниковые измерения, спутниковая градиентометрия); улучшением гравиметрической изученности ряда районов земного шара, в том числе благодаря развитию и расширению использования аэрогравиметрии; повышением точности и детальности цифровых моделей рельефа, используемых при обработке гравиметрической информации. На целом ряде примеров просматривается тенденция к созданию серийных, периодически обновляемых и уточняемых моделей региональных и национальных моделей геоида.

Разрешающая способность современных региональных и национальных моделей геоида варьируется от 5' до 1–2', в зависимости от полноты и качества исходной гравиметрической информации. Соответственно, в той же мере

варьируются и точностные характеристики моделей, от нескольких дециметров до нескольких сантиметров. Точность гравиметрических моделей геоида, как правило, контролируется путем сравнения с ВГ (ВКГ), полученными спутниковым методом в нивелирных пунктах. При этом получают не только точечные (абсолютные), но и разностные (относительные) оценки, характеризующие погрешность передачи ВГ (ВКГ) в зависимости от расстояния. Полнота и достоверность таких оценок в значительной степени зависит от плотности и точности высотной привязки контрольных геодезических пунктов.

Помимо характеристик исходной информации на точность определения ВГ (ВКГ) влияет методика ее обработки. Распространенный подход к преобразованию АСТ в ВГ (ВКГ) базируется на использовании модифицированного интеграла Стокса в сочетании с техникой «удаления-восстановления». Примером может служить методика UNB. Альтернативным вариантом является методика КТН, реализующая, в современной интерпретации, классическую схему вычисления ВГ по АСТ с использованием модифицированного интеграла Стокса. Обе методики теоретически обеспечивают сантиметровый уровень точности цифрового картографирования геоида.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гравиметрия и геодезия*. – М.: Научный мир, 2010. – 723 с.
2. *Косенко В.Е.* и др. Комплексные исследования по обоснованию путей создания, принципов построения, определению проектного облика космической системы глобального геодезического мониторинга / Пятая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2013), 15-19 апреля 2013 г., Санкт-Петербург, Россия: тезисы докладов. – СПб: ИПА РАН, 2013. – С. 15–17.
3. *Varga M.* et al. Regional geoidi u svijetu //Ekscentar. – 2012. – 15. – Pp. 82–87.
4. *Denker H, Barriot J.-P., Barzaghi R.* et al. The Development of the European Gravimetric Geoid Model EGG07 / IAG Symposia. – 2009. – 133. – Pp. 177–185.
5. *Kenyon, S., and R. Forsberg* (2001), Arctic Gravity Project—A status, in Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, International Association of Geodesy Symposia, vol. 123, edited by M. G. Sideris, pp. 391 – 395, Springer, New York.
6. *Blizkow D.* et al The progress of the geoid model for South America under GRACE and EGM2008. In: Kenyon S. M Pacino and U Marti (Eds.): Geodesy for planet Earth, international association of geodesy symposia. 2012. vol 136 Springer Verlag. Part 5, - 2012, Pp 893–899.
7. *de Matos A.* et al. Evaluation of recent GOCE geopotential models in South America/ Newton's Bulletin. – 2015. – №. 5. – Pp. 83–103.

8. Merry C.L. EGM2008 evaluation for Africa //Newton's Bulletin. – 2009. – №4. – Pp. 200–206.
9. Brown N. Featherstone W. Hu G. et al. AUSGeoid09: a more direct and more accurate model for converting ellipsoidal heights to AHD heights // Journal of Spatial Science. - 2011. – 56. – Pp.27–37
10. Featherstone W.E. et al. The AUSGeoid09 model of the Australian Height Datum // Journal of Geodesy. – 2011. – Vol. 85. – № 3. – Pp. 133–150.
11. Scheinert M. , Ferraccioli F., Muller J. et al. Modelling recent airborne gravity data over the Antarctic Peninsula for regional geoid improvement /Online Proc. 10 ISAES. USGS Open File Report 2007-1047. – 4 pp.
12. Scheinert M. et al. New Antarctic gravity anomaly grid for enhanced geodetic and geophysical studies in Antarctica //Geophysical Research Letters. – 2016. – Vol. 43. – 2. – Pp.600–610.
13. Scheinert M. et al. Regional geoid determination in Antarctica utilizing airborne gravity and topography data // Journal of Geodesy. – 2008. – 82(7). – Pp. 403–414.
14. Schwabe J. et al. Regional geoid modeling in the area of subglacial Lake Vostok, Antarctica // Journal of Geodynamics. – 2013. – 75.
15. Roman D.R. and Weston N.D. Beyond GEOID12: Implementing a New Vertical Datum for North America. In Proceedings of the FIG Working Week 2012 on «Knowing to manage a territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage», Rome, Italy, May 6-10, 2012 (online). – 2012. URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts04b/Ts04B_weston_5691.pdf.
16. Hayden T.T. Geopotential of the Geoid-Based North American Vertical Datum / University of Calgary, Department of Geomatics Engineering. –Calgary, Alberta, 2013, xxii+174 pp., URL:http://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/MGS/07.20381_TasnuvaHayden.pdf.
17. Ellmann A., Vanicek P. UNB application of Stokes–Helmert's approach to geoid computation // Journal of Geodynamics. – 2007. – 43. – Pp. 200–213.
18. Véronneau M., Huang J. The Canadian Geodetic Vertical Datum of 2013 / A modernized Reference for Heights Height System Unification with GOCE 19-20 February 2013, Noordwijk, Netherlands. URL: http://www.goceplushsu.eu/ext/doc/finmeet/12-Canada_Veronneau.pdf.
19. Avalos D. et al. Insights into the Mexican gravimetric geoid GGM05 / International Association of Geodesy Symposia 133. – 2009, pp. 421–425
20. LI Jiancheng. The Recent Chinese Terrestrial Digital Height Datum Model: Gravimetric QuasiGeoid CNGG2011 // Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. – 2012. – 41(5). – Pp. :651–660.
21. Sjöberg, L.E. Refined least squares modification of Stokes formula. Manusc.Geod. – 1991.– 16. – Pp. 367–375.
22. Inerbayeva D. Determination of a gravimetric geoid model of Kazakhstan using the KTH-method / Royal Institute of Technology, Stockholm. – 2010, 60 pp.
23. Munkhtsetseg D. Geodetic Network and Geoid Model of Mongolia /In: International Conference on Geospatial Solutions for Emergency Management and the 50th Anniversary of the Chinese Academy of Surveying and Mapping 14-16 September 2009. – 2009, Pp. 121–125.
24. Corchete V. The first highresolution gravimetric geoid for Ukraine: UGG2013/ Server on Geodesy, Seismology and Environmental Sciences. URL: <http://airy.ual.es/> - 2013, 5 pp.

Принята к печати 17 марта 2016 г.

Рекомендована кафедрой высшей геодезии МИИГАиК

ГЕОДЕЗИЯ И КАДАСТР

ТЕОРЕМЫ ПИЦЕТТИ И КЛЕРО В ПОСТ-НЬЮТОНОВСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

©2016 С. Копейкин^{1,2}, В. Хан³, Е. Мазурова^{2,4}¹Университет Миссури, США,²Сибирский университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия³Шанхайская астрономическая обсерватория, Китай⁴Московский университет геодезии и картографии, Россия

kopeikins@missouri.edu, wbhan@shao.ac.cn, e_mazurova@mail.ru

Аннотация. В настоящее время бурно развивается принципиально новый метод определения разности потенциалов и высот (нормальных, ортометрических), который называется хронометрическим нивелированием. Данный метод основан на измерении релятивистского эффекта гравитационного красного смещения частоты посредством атомных часов. Однако, чтобы говорить о развитии нового направления в геодезии – релятивистского, необходимо показать, что релятивистский подход применим ко всем теоремам, уравнениям и методам классической геодезии. В данной статье представлены выводы теорем Пицетти и Клеро в пост-Ньютоновском подходе.

Ключевые слова: релятивистская геодезия, теоремы Пицетти и Клеро

PITSETTI'S AND CLAIRAUT'S THEOREMS IN THE POST-NEWTONIAN APPROACH

©2016 Kopeikin S.^{1,2}, Han W.³, Mazurova E.^{2,4}¹University of Missouri, USA²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia³Shanghai Astronomical Observatory, China⁴Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

kopeikins@missouri.edu, wbhan@shao.ac.cn, e_mazurova@mail.ru

Abstract. Now violently essentially new method to define a potential difference and heights (normal, orthometric) which is called chronometric leveling develops. This method is based on measurement of relativistic effect of gravitational red shift of frequency by means of an atomic clock. However, speaking about development of the new direction in geodesy – relativistic, it is necessary to show that we will apply relativistic approach to all theorems, equations and methods of classical geodesy. The Post-Newtonian Pitsetti's and Clairaut's theorems are presented in this article.

Keywords: relativistic geodesy, Pitsetti's and Clairaut's theorems

Введение. В настоящее время достаточно быстро развивается новое направление геодезии — релятивистская геодезия, которая направлена на применение релятивистского подхода к уравнениям и методам классической геодезии [1–3].

Пост-Ньютоновские эффекты деформируют форму эллипсоида [4, 5] и модифицируют основные уравнения классической геодезии [6, 7]. Чтобы гарантировать адекватность

геодезических преобразований координат на уровне миллиметров необходимо определить параметры пост-Ньютоновского эллипсоида и разработать модифицированный вид основных уравнений классической геодезии.

В классической геодезии большую роль играют теоремы Пицетти [8] и Клеро [9], которые устанавливают строгую связь между формой уровенного эллипсоида вращения a (большая полуось), угловой скоростью враще-

ния Земли ω и нормальной силой тяжести на полюсе γ_p и экваторе γ_e . Формула Пицетти в классической геодезии имеет вид [10]:

$$2\frac{\gamma_e}{a} + \frac{\gamma_p}{b} = \frac{3GM}{a^2b} - 2\omega^2. \quad (1)$$

Здесь M — масса эллипсоида; G — гравитационная константа; a и b — соответственно большая и малая полуоси эллипсоида.

Уравнение Клеро представим в виде [11]

$$\frac{\gamma_e}{a} - \frac{\gamma_p}{b} = \frac{3GM}{2a^2b} \frac{3e - e^2 - 3\sqrt{1-e^2} \arcsin e}{e^3} + \omega^2, \quad (2)$$

где e — первый эксцентриситет.

В последующих разделах мы представим выводы теорем Пицетти и Клеро в пост-Ньютоновском приближении.

Теорема Пицетти в пост-Ньютоновском приближении. Обозначим пост-Ньютоновское значение силы тяжести в виде $\gamma_i(x) = \{\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z\}$. Сила тяжести, измеряемая локальным наблюдателем, на эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли была получена в работах [12, 13] и задается уравнением [14]

$$\gamma_i = [\Lambda_i^j \partial_j W]_{x=\bar{x}}, \quad (3)$$

где $\partial_i \equiv \partial/\partial x^i$; W — пост-Ньютоновский гравитационный потенциал внутри вращающейся однородной жидкости, определяемый по формуле [11]

$$W(x) = W_0 + W_1 C(x) + W_2 C^2(x), \quad (4)$$

где W_0, W_1, W_2 — полиномы, зависящие только от координаты z ; $C(x) \equiv \frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} - 1$.

Полином W_0 является полиномом четвертой степени: $W_0 = K_0 + K_1 \frac{z^2}{b^2} + K_2 \frac{z^4}{b^4}$, где константы

$$K_0 = \frac{1}{2} \omega^2 a^2 + \pi G \rho a^2 (\mathfrak{I}_0 - \mathfrak{I}_1) + \frac{1}{8c^2} \omega^4 a^4 + \frac{1}{2} k \omega^2 a^2 (5\mathfrak{I}_0 - 17\mathfrak{I}_1 + 18\mathfrak{I}_2 - 6\mathfrak{I}_3) + \\ + \frac{1}{2} k \pi G \rho a^2 [6\mathfrak{I}_0^2 - \mathfrak{I}_0(22\mathfrak{I}_1 - 15\mathfrak{I}_2 + 6\mathfrak{I}_3) + \mathfrak{I}_1(29\mathfrak{I}_1 - 40\mathfrak{I}_2 + 18\mathfrak{I}_3)] + \\ + k \pi G \rho a^2 [(\mathfrak{I}_0 - 4\mathfrak{I}_1 + 10\mathfrak{I}_2 - 12\mathfrak{I}_3 + 6\mathfrak{I}_4)E_1 + 2(\mathfrak{I}_1 - 4\mathfrak{I}_2 + 6\mathfrak{I}_3 - 3\mathfrak{I}_4)E_3 + 6(\mathfrak{I}_2 - 2\mathfrak{I}_3 + \mathfrak{I}_4)E_2];$$

$$K_1 = -\frac{1}{2} \omega^2 a^2 - \pi G \rho a^2 (\mathfrak{I}_0 - 3\mathfrak{I}_1) - \frac{1}{4c^2} \omega^4 a^4 - k \omega^2 a^2 (5\mathfrak{I}_0 - 40\mathfrak{I}_1 + 66\mathfrak{I}_2 - 30\mathfrak{I}_3) - \\ - k \pi G \rho a^2 (6\mathfrak{I}_0^2 - 56\mathfrak{I}_0\mathfrak{I}_1 + 99\mathfrak{I}_1^2 + 67\mathfrak{I}_0\mathfrak{I}_2 - 176\mathfrak{I}_1\mathfrak{I}_2 - 30\mathfrak{I}_0\mathfrak{I}_3 + 90\mathfrak{I}_1\mathfrak{I}_3) - \\ - k \pi G \rho a^2 [2(\mathfrak{I}_0 - 12\mathfrak{I}_1 + 42\mathfrak{I}_2 - 60\mathfrak{I}_3 + 30\mathfrak{I}_4)E_1 - (\mathfrak{I}_0 - 18\mathfrak{I}_1 + 78\mathfrak{I}_2 - 120\mathfrak{I}_3 + 60\mathfrak{I}_4)E_3 - \\ - 12(\mathfrak{I}_1 - 6\mathfrak{I}_2 + 10\mathfrak{I}_3 - 5\mathfrak{I}_4)E_2];$$

$$K_2 = \frac{1}{8c^2} \omega^4 a^4 + \frac{1}{2} k \omega^2 a^2 (5\mathfrak{I}_0 - 63\mathfrak{I}_1 + 130\mathfrak{I}_2 - 70\mathfrak{I}_3) + \\ + \frac{1}{6} k \pi G \rho a^2 [18\mathfrak{I}_0^2 - 5\mathfrak{I}_0(54\mathfrak{I}_1 - 89\mathfrak{I}_2 + 42\mathfrak{I}_3) + \mathfrak{I}_1(543\mathfrak{I}_1 - 1160\mathfrak{I}_2 + 630\mathfrak{I}_3)] + \\ + k \pi G \rho a^2 (\mathfrak{I}_0 - 20\mathfrak{I}_1 + 90\mathfrak{I}_2 - 140\mathfrak{I}_3 + 70\mathfrak{I}_4)(E_1 + E_2 - E_3).$$

Здесь [11]

$$\mathfrak{I}_0 = 2 \frac{\sqrt{1-e^2}}{e} \arcsin e; \quad (5)$$

$$\mathfrak{I}_1 = \frac{\sqrt{1-e^2}}{e^3} \arcsin e - \frac{1-e^2}{e^2}; \quad (6)$$

$$\mathfrak{I}_2 = \frac{3}{4} \frac{\sqrt{1-e^2}}{e^5} \arcsin e - \frac{(1-e^2)(3+2e^2)}{4e^4}; \quad (7)$$

$$\mathfrak{I}_3 = \frac{5}{8} \frac{\sqrt{1-e^2}}{e^7} \arcsin e - \frac{(1-e^2)(15+10e^2+8e^4)}{24e^6}; \quad (8)$$

$$\mathfrak{I}_4 = \frac{35}{64} \frac{\sqrt{1-e^2}}{e^9} \arcsin e - \frac{(1-e^2)(105+70e^2+56e^4+48e^6)}{192e^8}, \quad (9)$$

E_1, E_2, E_3 — числовые калибровочные коэффициенты.

Коэффициент W_1 в уравнении (3) — полином второй степени:

$$W_1 = P + P_1 \frac{z^2}{b^2},$$

где константы

$$P = \frac{1}{2} \omega^2 a^2 \left[1 + \frac{1}{2c^2} \omega^2 a^2 + k(3\mathfrak{I}_0 - 18\mathfrak{I}_1 + 28\mathfrak{I}_2 - 12\mathfrak{I}_3) \right] - \pi G \rho a^2 \mathfrak{I}_1 -$$

$$- k \pi G \rho a^2 \left[2(\mathfrak{I}_1 - 5\mathfrak{I}_2 + 9\mathfrak{I}_3 - 6\mathfrak{I}_4)E_1 - (\mathfrak{I}_1 - 8\mathfrak{I}_2 + 18\mathfrak{I}_3 - 12\mathfrak{I}_4)E_3 - 6(\mathfrak{I}_2 - 3\mathfrak{I}_3 + 2\mathfrak{I}_4)E_2 \right] -$$

$$- k \pi G \rho a^2 (6\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_1 - 11\mathfrak{I}_1^2 - 11\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_2 + 28\mathfrak{I}_1 \mathfrak{I}_2 + 6\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_3 - 18\mathfrak{I}_1 \mathfrak{I}_3);$$

$$P_1 = \frac{1}{4c^2} \omega^2 a^4 - \frac{3}{2} k \omega^2 a^2 (\mathfrak{I}_0 - 16\mathfrak{I}_1 + 36\mathfrak{I}_2 - 20\mathfrak{I}_3) +$$

$$+ k \pi G \rho a^2 \left[2(3\mathfrak{I}_1 - 25\mathfrak{I}_2 + 51\mathfrak{I}_3 - 30\mathfrak{I}_4)(E_1 + E_2 - E_3) + \right.$$

$$\left. + 20\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_1 - 45\mathfrak{I}_1^2 - 55\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_2 + 140\mathfrak{I}_1 \mathfrak{I}_2 + 30\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_3 - 90\mathfrak{I}_1 \mathfrak{I}_3 \right].$$

Коэффициент W_2 в уравнении (3) является постоянным, и задается выражением

$$W_2 = \frac{1}{8c^2} \omega^4 a^4 - \frac{1}{2} k \omega^2 a^2 (3\mathfrak{I}_1 - 2\mathfrak{I}_2 - 6\mathfrak{I}_3) +$$

$$+ k \pi G \rho a^2 \left[(\mathfrak{I}_2 - 6\mathfrak{I}_3 + 6\mathfrak{I}_4)(E_1 + E_2 - E_3) - \frac{1}{2} (\mathfrak{I}_1^2 + \mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_2 - 8\mathfrak{I}_1 \mathfrak{I}_2 - 6\mathfrak{I}_0 \mathfrak{I}_3 + 18\mathfrak{I}_1 \mathfrak{I}_3) \right].$$

Значение матрицы перехода от (локально-инерциальной) топоцентрической системы координат наблюдателя к геоцентрическим координатам, Λ_i^j , в уравнении (2) определяется в виде [11]

$$\Lambda_i^j = \delta^{ij} \left(1 - \frac{1}{c^2} V_N \right) - \frac{1}{2c^2} v^i v^j,$$

где $v^i = (\omega \times x)^i$ — скорость наблюдателя относительно глобальных координат; V_N — Ньютоновский потенциал, который определяется выражением [11],

$$V_N = \pi G \rho a^2 \left[\left(1 - \frac{z^2}{b^2} \right) \mathfrak{I}_0 - \left(1 - 3 \frac{z^2}{b^2} \right) \mathfrak{I}_1 - C(x) \mathfrak{I}_1 \right].$$

Подчеркнем, что мы сначала берем частную производную в (3) и затем пространственную координату x на эквипотенциальной поверхности.

Скорость является ортогональной к градиенту всюду, то есть

$$v^i \partial_i W = 0. \quad (10)$$

Действительно, легко доказать, что

$$v^i \partial_i W = \omega (x \partial_y W - y \partial_x W). \quad (11)$$

Частные производные вычисляем, используя выражение (4):

$$\partial_x W = \frac{dW}{dC} \partial_x C(x) = \frac{dW}{dC} \frac{2x}{a^2}; \quad \partial_y W = \frac{dW}{dC} \partial_y C(x) = \frac{dW}{dC} \frac{2y}{a^2}. \quad (12)$$

Подстановка частных производных (12) в выражение (11) дает выражение (10), что и требовалось доказать. С учетом уравнения (11), выражение (3) упрощается:

$$\gamma_i(\bar{x}) = \left[\left(1 - \frac{1}{c^2} V_N \right) \partial_i W \right]_{x=\bar{x}}. \quad (13)$$

Возьмем пост-Ньютоновский эллипсоид [11]

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 + kF(x); \quad k \equiv \pi G \rho \frac{a^2}{c^2}$$

в виде эквипотенциальной поверхности, охватывающей всю вращающуюся массу и обозначим пост-Ньютоновскую силу тяжести на полюсе через $\gamma_p \equiv \gamma_z (x = y = 0, z = r_p)$, а на экваторе через $\gamma_e \equiv \gamma_y (x = z = 0, y = r_e)$. Здесь радиус экватора определяется из выражения [11] $r_e = a \left(1 + \frac{1}{2} k E_1 \right)$,

а полярный радиус по формуле [11] $r_p = b \left(1 + \frac{1}{2} k E_2 \right)$; $E_i (i = 1, 2)$ — калибровочные числовые коэффициенты. Возьмем значение частной производной от W в уравнении (13), тогда получим:

$$\begin{aligned} \gamma_p = & \frac{2\pi G \rho a^2}{b} (\mathfrak{T}_0 - 2\mathfrak{T}_1) + 16 \frac{\omega^2 a^2}{b} k (\mathfrak{T}_1 - 3\mathfrak{T}_2 + 2\mathfrak{T}_3) + \\ & + \frac{\pi G \rho a^2}{b} k [2(\mathfrak{T}_0 - 5\mathfrak{T}_1 + 4\mathfrak{T}_2) E_1 - (\mathfrak{T}_0 - 8\mathfrak{T}_1 + 8\mathfrak{T}_2) E_2 - \\ & - 2(\mathfrak{T}_0 - 17\mathfrak{T}_1 + 60\mathfrak{T}_2 - 76\mathfrak{T}_3 + 32\mathfrak{T}_4)(E_1 + E_2 - E_3)] + \\ & + \frac{4\pi G \rho a^2}{3b} k [\mathfrak{T}_0(27\mathfrak{T}_1 - 56\mathfrak{T}_2 + 24\mathfrak{T}_3) - 2\mathfrak{T}_1(33\mathfrak{T}_1 - 74\mathfrak{T}_2 + 36\mathfrak{T}_3)]; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \gamma_e = & a \left(2\mathfrak{T}_1 G \pi \rho - \omega^2 \right) - \frac{\omega^4 a^3}{2c^2} + k \left[-3\mathfrak{T}_0 + 18\mathfrak{T}_1 - 28\mathfrak{T}_2 + 12\mathfrak{T}_3 + \left(\mathfrak{T}_0 - \mathfrak{T}_1 - \frac{1}{2} E_1 \right) \right] \omega^2 a + \\ & + k \pi G \rho a (3\mathfrak{T}_1 - 4\mathfrak{T}_2) E_1 - 2(\mathfrak{T}_1 - 2\mathfrak{T}_2) E_2 + 2(\mathfrak{T}_1 - 8\mathfrak{T}_2 + 18\mathfrak{T}_3 - 12\mathfrak{T}_4)(E_1 + E_2 - E_3) + \\ & + 2k \pi G \rho a [\mathfrak{T}_0(5\mathfrak{T}_1 - 11\mathfrak{T}_2 + 6\mathfrak{T}_3) E_1 - 2\mathfrak{T}_1(5\mathfrak{T}_1 - 14\mathfrak{T}_2 + 9\mathfrak{T}_3)]. \end{aligned} \quad (15)$$

Правые части уравнений (14) и (15) зависят от большой a и малой b полуосей эллипсоида Маклорена, но они не являются определяемыми параметрами пост-Ньютоновского эллипсоида, который задается полярным и экваториальным радиусами. Кроме того, правые части уравнений (14) и (15) зависят от калибровочных параметров E_1 и E_2 . Заменим параметры a и b на r_e и r_p и выполним преобразование теоремы Пицетти из Ньютоновской в пост-Ньютоновскую аппроксимацию.

$$\begin{aligned}
 2\frac{\gamma_e}{r_e} + \frac{\gamma_p}{r_p} = & 2\pi G\rho \left[2\mathfrak{T}_1 + \frac{a^2}{b^2}(\mathfrak{T}_0 - 2\mathfrak{T}_1) \right] - 2\omega^2 - \frac{1}{c^2}\omega^4 a^2 - \\
 & - 2k \left[2\mathfrak{T}_0 - 17\mathfrak{T}_1 + 28\mathfrak{T}_2 - 12\mathfrak{T}_3 - 8\frac{a^2}{b^2}(\mathfrak{T}_1 - 3\mathfrak{T}_2 + 2\mathfrak{T}_3) \right] \omega^2 + \\
 & + 2k\pi G\rho \left[2\mathfrak{T}_1 - 16\mathfrak{T}_2 + 36\mathfrak{T}_3 - 24\mathfrak{T}_4 - \frac{a^2}{b^2}(\mathfrak{T}_0 - 17\mathfrak{T}_1 + 60\mathfrak{T}_2 - 76\mathfrak{T}_3 + 32\mathfrak{T}_4) \right] (E_1 + E_2 - E_3) + \\
 & + 2k\pi G\rho \left[(2\mathfrak{T}_1 - 4\mathfrak{T}_2) + \frac{a^2}{b^2}(\mathfrak{T}_0 - 5\mathfrak{T}_1 + 4\mathfrak{T}_2) \right] (E_1 - E_2) + \\
 & + 4k\pi G\rho \left[\mathfrak{T}_0(5\mathfrak{T}_1 - 11\mathfrak{T}_2 + 6\mathfrak{T}_3) - 2\mathfrak{T}_1(5\mathfrak{T}_1 - 14\mathfrak{T}_2 + 9\mathfrak{T}_3) \right] + \\
 & + \frac{4a^2}{3b^2} k\pi G\rho \left[\mathfrak{T}_0(27\mathfrak{T}_1 - 56\mathfrak{T}_2 + 24\mathfrak{T}_3) - 2\mathfrak{T}_1(33\mathfrak{T}_1 - 74\mathfrak{T}_2 + 36\mathfrak{T}_3) \right]. \tag{16}
 \end{aligned}$$

Правая часть уравнения (16) по-прежнему явно зависит от калибровочных параметров E_1 и E_2 . Тем не менее, можно проверить, что числовой коэффициент, стоящий перед $E_1 - E_2$, тождественно равен нулю, поэтому уравнение (16) упрощается:

$$\begin{aligned}
 2\frac{\gamma_e}{r_e} + \frac{\gamma_p}{r_p} = & 4\pi G\rho - 2\omega^2 - \frac{1}{c^2}\omega^4 a^2 - \frac{k}{3e^7} \left[e(1-e^2)(105 - 104e^2 + 42e^4) - \right. \\
 & \left. - 3\sqrt{1-e^2}(5-4e^2)(7-6e^2+2e^4)\arcsin e \right] \omega^2 + \\
 & + \frac{k\pi G\rho}{12e^9} (7-4e^2) \left[5e(21-31e^2+10e^4) - 3\sqrt{1-e^2}(35-40e^2+8e^4)\arcsin e \right] (E_1 + E_2 - E_3) + \\
 & + \frac{k\pi G\rho}{3e^{10}} (1-e^2) \left[-315e^2 + 621e^4 - 250e^6 + 24e^8 + \right. \\
 & \left. + 2e\sqrt{1-e^2}(315-516e^2+169e^4-18e^6)\arcsin e - 3(105-242e^2+178e^4-40e^6)\arcsin^2 e \right]. \tag{17}
 \end{aligned}$$

$$\text{Здесь } e \equiv \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}. \tag{18}$$

Соотношение (17) зависит только от линейной комбинации параметров $E_1 + E_2 - E_3$, которые являются функцией эксцентриситета e .

Для того чтобы сравнить формулу (17) с классической формулой (1), мы выразим постоянную плотность ρ через общую релятивистскую массу M пост-Ньютоновского эллипсоида путем использования уравнения [11]

$$\rho = \frac{3M}{4\pi r_e^2 r_p} \left[1 + \frac{k}{5} \left(E_1 + E_2 - E_3 - 10\mathfrak{T}_0 - \frac{2\omega^2}{\pi G\rho} \right) \right]. \tag{19}$$

Подставляя (19) в (17) получим:

$$\begin{aligned}
 2 \frac{\gamma_e}{r_e} + \frac{\gamma_p}{r_p} = & \frac{3GM}{r_e^2 r_p} - 2\omega^2 - \frac{\omega^4 r_e^2}{c^2} + \frac{3\sqrt{1-\varepsilon^2}}{16\varepsilon^9 r_e^2 r_p^2} \frac{G^2 M^2}{c^2} \left[\varepsilon \sqrt{1-\varepsilon^2} (-315 + 62\varepsilon^2 - 250\varepsilon^4 + 24\varepsilon^6) + \right. \\
 & + 2(315 - 831\varepsilon^2 + 685\varepsilon^4 - 187\varepsilon^6 + 48\varepsilon^8) \arcsin \varepsilon \left. \right] + \\
 & + \frac{1}{20\varepsilon^7 r_p} \frac{GM\omega^2}{c^2} \left[\varepsilon (-525 + 1045\varepsilon^2 - 730\varepsilon^4 + 234\varepsilon^6) + \right. \\
 & + 15 \frac{35 - 93\varepsilon^2 + 92\varepsilon^4 - 42\varepsilon^6 + 8\varepsilon^8}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \arcsin \varepsilon \left. \right] - \\
 & - \frac{9}{16} \frac{G^2 M^2}{c^2} \frac{105 - 347\varepsilon^2 + 420\varepsilon^4 - 218\varepsilon^6 + 40\varepsilon^8}{\varepsilon^{10} r_e^2 r_p^2} \arcsin^2 \varepsilon + \\
 & + \frac{3}{320\varepsilon^8 r_e^2 r_p^2} \frac{G^2 M^2}{c^2} (E_1 + E_2 - E_3) \times \\
 & \times \left(3675 - 7525\varepsilon^2 + 4850\varepsilon^4 - 1000\varepsilon^6 - 48\varepsilon^8 - 15 \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2}}{\varepsilon} (7 - 4\varepsilon^2) (35 - 40\varepsilon^2 + 8\varepsilon^4) \arcsin \varepsilon \right). \quad (20)
 \end{aligned}$$

Здесь мы использовали в пост-Ньютоновских членах эксцентриситет ε , который определяется из уравнения

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{r_e^2 - r_p^2}}{r_e} \quad (21)$$

вместо эксцентриситета e из (18), потому что они отличаются только в пост-Ньютоновских членах, где выполнение условия равного потенциала на поверхности вращающейся жидкости требует наложения ограничения на комбинацию параметров $E_1 + E_2 - E_3 = f(\varepsilon)$ с функцией $f(\varepsilon)$, определяемой из формулы [11]

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\omega^2}{2\pi G\rho} + \mathfrak{S}_0 - 21\mathfrak{S}_1 + 90\mathfrak{S}_2 - 140\mathfrak{S}_3 + 70\mathfrak{S}_4 \right) (E_1 + E_2 - E_3) = \\
 & = - \frac{\omega^4}{8(\pi G\rho)^2} - \frac{\omega^2}{4\pi G\rho} (5\mathfrak{S}_0 - 63\mathfrak{S}_1 + 130\mathfrak{S}_2 - 70\mathfrak{S}_3) - \\
 & - \frac{1}{6} [18\mathfrak{S}_0^2 - 5\mathfrak{S}_0(54\mathfrak{S}_1 - 89\mathfrak{S}_2 + 42\mathfrak{S}_3) + \mathfrak{S}_1(543\mathfrak{S}_1 - 1160\mathfrak{S}_2 + 630\mathfrak{S}_3)]. \quad (22)
 \end{aligned}$$

Уравнение (20) выражает теорему Пицетти в пост-Ньютоновском подходе (классический результат см. в уравнении (1)). Это говорит нам, что также как в теории Ньютона, линейная комбинация пост-Ньютоновских сил тяжести, измеренных на поверхности пост-Ньютоновского эллипсоида на полюсе и на экваторе, является функцией только четырех параметров: пост-Ньютоновской массы M ; угловой скорости вращения ω ; экваториального r_e и полярного r_p радиусов пост-Ньютоновского эллипсоида.

Теорема Клеро в пост-Ньютоновском приближении. Для того чтобы получить аналог классической теоремы Клеро (2) в пост-Ньютоновском подходе, мы следовали классическому выводу, данному в работе [8].

Используя уравнения (14) и (15) имеем:

$$\begin{aligned}
 \frac{\gamma_e}{r_e} - \frac{\gamma_p}{r_p} = & 2\pi G\rho \left[-\mathfrak{I}_1 + \frac{a^2}{b^2} (\mathfrak{I}_0 - 2\mathfrak{I}_1) \right] + \omega^2 + \frac{1}{2c^2} \omega^4 a^2 + \\
 & + k \left[2\mathfrak{I}_0 - 17\mathfrak{I}_1 + 28\mathfrak{I}_2 - 12\mathfrak{I}_3 + 16 \frac{a^2}{b^2} (\mathfrak{I}_1 - 3\mathfrak{I}_2 + 2\mathfrak{I}_3) \right] \omega^2 + \\
 & + k\pi G\rho [-2\mathfrak{I}_1 + 16\mathfrak{I}_2 - 36\mathfrak{I}_3 + 24\mathfrak{I}_4 - \\
 & - \frac{2a^2}{b^2} (\mathfrak{I}_0 - 17\mathfrak{I}_1 + 60\mathfrak{I}_2 - 76\mathfrak{I}_3 + 32\mathfrak{I}_4)] (E_1 + E_2 - E_3) - \\
 & - 2k\pi G\rho \left[(\mathfrak{I}_1 - 2\mathfrak{I}_2) - \frac{a^2}{b^2} (\mathfrak{I}_0 - 5\mathfrak{I}_1 + 4\mathfrak{I}_2) \right] (E_1 - E_2) + \\
 & + 2k\pi G\rho \left[\mathfrak{I}_0 (-5\mathfrak{I}_1 + 11\mathfrak{I}_2 - 6\mathfrak{I}_3) + 2\mathfrak{I}_1 (5\mathfrak{I}_1 - 14\mathfrak{I}_2 + 9\mathfrak{I}_3) \right] + \\
 & + \frac{4a^2}{3b^2} k\pi G\rho [\mathfrak{I}_0 (27\mathfrak{I}_1 - 56\mathfrak{I}_2 + 24\mathfrak{I}_3) - \\
 & - 2\mathfrak{I}_1 (33\mathfrak{I}_1 - 74\mathfrak{I}_2 + 36\mathfrak{I}_3)].
 \end{aligned}$$

Для правой части формулы (17) используем формулы (5) (9) с их явными выражениями через эксцентриситет e из (18) эллипсоида Маклорена. В результате имеем:

$$\begin{aligned}
 \frac{\gamma_e}{r_e} - \frac{\gamma_p}{r_p} = & \frac{6\pi G\rho}{e^3} \left(e - \sqrt{1-e^2} \arcsin e \right) - 2\pi G\rho + \omega^2 + \frac{1}{2c^2} \omega^4 a^2 + \\
 & + \frac{k}{6e^7} (-75e - 5e^3 + 122e^5 - 42e^7 + 3\sqrt{1-e^2} (25 + 10e^2 - 34e^4 + 8e^6) \arcsin e) \omega^2 + \\
 & + \frac{k}{24e^9} \pi G\rho [525e - 1075e^3 + 622e^5 - 122e^7 - \\
 & - 3\sqrt{1-e^2} (175 - 300e^2 + 144e^4 - 16e^6) \arcsin e] (E_1 + E_2 - E_3) - \\
 & - \frac{3k}{e^5} \pi G\rho \left[3e(1-e^2) - \sqrt{1-e^2} (3-2e^2) \arcsin e \right] (E_1 - E_2) - \\
 & - \frac{k}{6e^9} \pi G\rho (1-e^2) [e(225 - 351e^2 - 58e^4 + 24e^6) - \\
 & - 2\sqrt{1-e^2} (225 - 276e^2 - 85e^4 + 18e^6) \arcsin e] - \\
 & - \frac{k}{2e^{10}} \pi G\rho (1-e^2) (225 - 351e^2 - 58e^4 + 24e^6) \arcsin^2 e. \tag{23}
 \end{aligned}$$

Эта форма теоремы Клеро очевидно зависит от калибровочных параметров E_1 , E_2 и может использоваться для того, чтобы наложить ограничения на один из них в дополнение к ограничению, заданному уравнением уровенной поверхности (22). Например, мы можем потребовать, чтобы все пост-Ньютоновские члены в уравнении (23) исчезли. Такой выбор калибровочных параметров может использоваться вместо ограничений, предложенных Бардином (Bardeen) [15]:

$$\begin{aligned}
 8E_1 + 3E_2 + 2E_3 &= -20\mathfrak{I}_0 - \frac{4\omega^2}{\pi G\rho}; \\
 32E_1 - 3E_2 + 3E_3 &= -40(3\mathfrak{I}_0 - 4\mathfrak{I}_1) - \frac{6\omega^2}{\pi G\rho}.
 \end{aligned}$$

Данная калибровка интересна с точки зрения астрофизики, т.к. позволяет приравнять массу и угловой момент вращающейся пост-Ньютоновской звезды к аналогичным величинам Ньютоновской конфигурации той же звезды. Однако более интересно привести уравнение (23) к другой форме, которая больше соответствует геодезическим задачам и не содержит явно калибровочные параметры E_1 и E_2 . Это достигается путем замены эксцентриситета ε эллипсоида Маклорена на эксцентриситет пост-Ньютоновского эллипсоида:

$$e = \varepsilon - k \frac{1 - \varepsilon^2}{2\varepsilon} (E_1 - E_2). \quad (24)$$

Теперь подставляем (21) в (23), разлагаем в ряд Тейлора относительно k и ограничим степень разложения первой пост-Ньютоновской поправкой. Эта процедура полностью устраняет из уравнения (23) члены, пропорциональные разности $E_1 - E_2$, и в результате получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_e}{r_e} - \frac{\gamma_p}{r_p} = & \frac{6\pi G\rho}{\varepsilon^3} (\varepsilon - \sqrt{1 - \varepsilon^2} \arcsin \varepsilon) - 2\pi G\rho + \omega^2 + \frac{1}{2c^2} \omega^4 a^2 + \\ & + \frac{k}{6\varepsilon^7} (-75\varepsilon - 5\varepsilon^3 + 122\varepsilon^5 - 42\varepsilon^7 + 3\sqrt{1 - \varepsilon^2} (25 + 10\varepsilon^2 - 34\varepsilon^4 + 8\varepsilon^6) \arcsin \varepsilon) \omega^2 + \\ & + \frac{k}{24\varepsilon^9} \pi G\rho [525\varepsilon - 1075\varepsilon^3 + 622\varepsilon^5 - 122\varepsilon^7 - \\ & - 3\sqrt{1 - \varepsilon^2} (175 - 300\varepsilon^2 + 144\varepsilon^4 - 16\varepsilon^6) \arcsin \varepsilon] (E_1 + E_2 - E_3) - \\ & - \frac{k}{6\varepsilon^9} \pi G\rho (1 - \varepsilon^2) \left[\varepsilon (225 - 351\varepsilon^2 - 58\varepsilon^4 + 24\varepsilon^6) - 2\sqrt{1 - \varepsilon^2} (225 - 276\varepsilon^2 - 85\varepsilon^4 + 18\varepsilon^6) \arcsin \varepsilon \right] - \\ & - \frac{k}{2\varepsilon^{10}} \pi G\rho (1 - \varepsilon^2) (225 - 351\varepsilon^2 - 58\varepsilon^4 + 24\varepsilon^6) \arcsin^2 \varepsilon. \end{aligned} \quad (25)$$

Выразим в уравнении (25) плотность через массу пост-Ньютоновского эллипсоида, используя выражение

$$\rho = \frac{3M}{4\pi r_e^2 r_p} \left[1 + \frac{k}{5} \left(E_1 + E_2 - E_3 - 10\mathfrak{I}_0 - \frac{2\omega^2}{\pi G\rho} \right) \right].$$

Тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_e}{r_e} - \frac{\gamma_p}{r_p} = & \frac{3GM}{2r_e^2 r_p} \frac{3\varepsilon - \varepsilon^3 - 3\sqrt{1 - \varepsilon^2} \arcsin \varepsilon}{\varepsilon^3} + \omega^2 + \frac{a^2 \omega^4}{2c^2} - \\ & - \frac{\varepsilon (375 + 25\varepsilon^2 - 682\varepsilon^4 + 234\varepsilon^6) - 3\sqrt{1 - \varepsilon^2} (125 + 50\varepsilon^2 - 194\varepsilon^4 + 40\varepsilon^6) \arcsin \varepsilon}{40b\varepsilon^7} \frac{GM}{c^2} \omega^2 + \\ & + \frac{\varepsilon (2625 - 5375\varepsilon^2 + 3310\varepsilon^4 - 704\varepsilon^6 + 48\varepsilon^8) - \sqrt{1 - \varepsilon^2} (875 - 1500\varepsilon^2 + 720\varepsilon^4 - 128\varepsilon^6) \arcsin \varepsilon}{640a^3 b \varepsilon^9} \times \\ & \times \frac{3G^2 M^2}{c^2} (E_1 + E_2 - E_3) - \\ & - \frac{\varepsilon (1 - \varepsilon^2) (225 - 351\varepsilon^2 - 58\varepsilon^4 + 24\varepsilon^6) - 2\sqrt{1 - \varepsilon^2} (225 - 501\varepsilon^2 + 191\varepsilon^4 + 175\varepsilon^6 - 42\varepsilon^8) \arcsin \varepsilon}{160a^3 b \varepsilon^9} \times \\ & \times \frac{3GM}{c^2} - \frac{9}{32} \frac{G^2 M^2}{c^2} \frac{(75 - 142\varepsilon^2 + 38\varepsilon^4 + 88\varepsilon^6)}{a^4 \varepsilon^{10}} \arcsin^2 \varepsilon. \end{aligned} \quad (26)$$

Формула (26) выражает классическую теорему Клеро (2) в пост-Ньютоновском приближении. Мы можем видеть, что правая часть уравнения (23) зависит от параметров E_1 , E_2 и E_3 исключительно в форме линейной комбинации $E_1 + E_2 - E_3$, которая установлена физическим условием (22).

Заключение. Теоремы Пицетти и Клеро, которые в пост-Ньютоновском приближении имеют вид (20) и (26) соответственно, устанавливают строгую связь между силой тяжести на поверхности уровненного пост-Ньютоновского эллипсоида с четырьмя параметрами: пост-Ньютоновской массой M , угловой скоростью вращения Земли ω , и радиусами пост-Ньютоновского эллипсоида — экваториальным r_e и полярным r_p .

Данное исследование было выполнено при поддержке гранта № 14-27-00068 Российского научного фонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Chandrasekhar and D. D. Elbert, (1978). The deformed figures of the Dedekind ellipsoids in the post-Newtonian approximation to general relativity—Corrections and amplifications, *Astrophys. J.* 220: 303–313, February.
2. R. Meinel, M. Ansorg, A. Kleinwächter, G. Neugebauer, and D. Petroff (2008), *Relativistic Figures of Equilibrium* (Cambridge University Press, Cambridge, England), pp. ix+218.
3. R. Bondarescu, M. Bondarescu, G. Hetényi, L. Boschi, P. Jetzer, and J. Balakrishna (2012). Geophysical applicability of atomic clocks: Direct continental geoid mapping, *Geophysical Journal International*, 191:7882, October.
4. S. Chandrasekhar, (1965). The post-Newtonian effects of general relativity on the equilibrium of uniformly rotating bodies. I. The Maclaurin spheroids and the virial theorem, *Astrophys. J.* 142: 1513–1518, November.
5. J.M. Bardeen, (1971). A reexamination of the post-Newtonian Maclaurin spheroids, *Astrophys. J.* 167, 425, August.
6. S. Kopeikin, M. Efroimsky, and G. Kaplan, (2011) *Relativistic Celestial Mechanics of the Solar System* (Wiley, Berlin), p. xxxii+860.
7. E. Mai, (2014). Time, atomic clocks, and relativistic geodesy. Report № 124, Deutsche Geodätische Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, pp. 128, Available online: <http://dgk.badw.de/fileadmin/docs/a-124.pdf>.
8. Pizetti P. (1913). *Principii della teoria meccanica della figura dei pianeti*. E.Spoerri, Piza, XIII+251 pp.
9. Clairaut, A.C. (1743). *Théorie de la Figure de la Terre*, Tirée de l'Hydrostatique. Chez David Fils, Paris ; deuxième édition parue en 1808 chez Courcier, Paris.
10. W. Torge and J. Müller (2012). *Geodesy*, 4th ed. (De Gruyter, Berlin), p. 433.
11. S. Kopeikin, W. Han, E. Mazurova (2016), Post-Newtonian reference-ellipsoid for relativistic geodesy, Vol. 93, *Physical Review D*.
12. S.M. Kopeikin (1991). Relativistic manifestations of gravitational fields in gravimetry and geodesy, *Manuscripta Geodaetica* 16, 301.
13. M. Kopeikin, E. M. Mazurova, and A.P. Karpik, (2015). Towards an exact relativistic theory of Earth's geoid undulation, *Phys. Lett. A* 379, 1555-1562.
14. S. Kopeikin, M. Efroimsky, and G. Kaplan, (2011). *Relativistic Celestial Mechanics of the Solar System* (Wiley, Berlin), p. xxxii+860.
15. J.M. Bardeen, (1971). A reexamination of the post-Newtonian Maclaurin spheroids, *Astrophys. J.* 167, 425.

Принята к печати 28 апреля 2016 г.

Рекомендована кафедрой геодезии МИИГАиК

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ИНТЕГРАЛА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛИНЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

©2016 П.А. Медведев

Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Россия
omgau-math@rambler.ru

Аннотация. Выполнено исследование математической модели обобщенного эллиптического интеграла, представленного в форме ряда с общим членом. Анализируются разные методы вывода алгоритмов, изучается их структура и свойства, устанавливаются зависимости между этими алгоритмами. Дается обоснование вывода неравноточных формул из равноточных и, наоборот, с оценкой их точности. Приводятся подстановки, с помощью которых осуществляется переход от одного вида эллиптического интеграла к другому. Для вычисления длин линий на поверхности эллипсоида предлагается алгоритм в степенной форме с тригонометрическими функциями двойного аргумента.

Ключевые слова: математическая модель, эллиптический интеграл, алгоритмы, точность

MATHEMATICAL MODELS OF GENERALIZED ELLIPTIC INTEGRAL IN ORDER TO CALCULATE THE LENGTH OF GEODETIC LINE

©2016 Medvedev P.

Omsk State Agrarian University (OSAU), Russia
omgau-math@rambler.ru

Abstract. Investigation of mathematical model of generalized elliptical integral, performed in the row form with common term has been done. Different methods of algorithms deduction are analyzed, their structure and properties are studied, dependences between these algorithms are also established. Deduction substantiation of unequal precise formulas from equal precise and the wrong way round with their precision estimation is given. Transition from one elliptical integral to another is carried out with the help of substitution. Algorithm in degree form with trigonometrical functions of double argument is suggested for calculation the length of lines on the surface.

Keywords: mathematical model, elliptical integral, algorithms, precision

Задача определения взаимного положения двух точек на поверхности Земли и в околоземном пространстве, получившая название «решения главных геодезических задач» (ГГЗ), являясь глобальной по своему назначению, под влиянием научно-технического прогресса меняет только аспекты своего решения. В связи повышением точности измерений возникла необходимость в проведении специальных теоретических и методологических исследований по анализу и систематизации разработанных способов решения ГГЗ, обоснованию и развитию эффективных высокоточных методов их решения на поверхности эллипсоида и в пространстве с использованием современной вычислительной техники.

Вычисление длины дуги кривой на поверхности эллипсоида приводит к эллиптическим интегралам первого и второго родов, которые в конечном виде через элементарные функции не выражаются. Для их аппроксимации обычно используются отрезки рядов без указания общих членов. Такой подход к построению алгоритмов не позволяет выполнить их сравнительный анализ и указать методы их совершенствования.

В связи с этим исследования выполним на обобщенной математической модели эллиптического радикала, представленной в форме ряда [1]:

$$(1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} = 1 + \operatorname{sign} \alpha \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!!}{(2n)!!} v^n \sin^{2n} \varphi.$$

Этот функциональный ряд, мажорирующийся при любом φ сходящимся числовым рядом $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n - \alpha - 2)!!}{(2n)!!} |v|^n$, является равномерно сходящимся, поэтому его можно интегрировать в любых пределах [2, с. 427, с. 436]. В частности,

$$\int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = \int_0^{\varphi} d\varphi + \operatorname{sign} \alpha \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!! v^n}{(2n)!!} \int_0^{\varphi} \sin^{2n} \varphi d\varphi. \quad (1)$$

Для нахождения первообразных применяют как рекуррентную формулу

$$\int \sin^{2n} \varphi d\varphi = -\frac{1}{2n} \cos \varphi \sin^{2n-1} \varphi + \frac{2n-1}{2n} \int \sin^{2n-2} \varphi d\varphi,$$

так и общие. Определенный интеграл от четных степеней синуса удобнее вычислять по замкнутой формуле

$$\int_0^{\varphi} \sin^{2n} \varphi d\varphi = \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \varphi - \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \sum_{m=1}^n \frac{(2m-2)!!}{(2m-1)!!} \sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi, \quad (2)$$

чем по закономерностям, рекомендованным в [3, с. 26; 4, с. 126; 5; 6, с. 144]. Подставляя (2) в (1), получим

$$\begin{aligned} \int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = & \left(1 + \operatorname{sign} \alpha \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!! (2n - 1)!!}{((2n)!!)^2} v^n \right) \varphi - \\ & - \operatorname{sign} \alpha \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!! (2n - 1)!!}{((2n)!!)^2} v^n \sum_{m=1}^n \frac{(2m - 2)!!}{(2m - 1)!!} \sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi. \quad (3) \end{aligned}$$

Для приведения подобных членов вида $\sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi$ изменим порядок суммирования во втором выражении равенства (3). Так как во второй сумме индекс m изменяется от 1 до n , а в первой сумме n принимает значения от 1 до ∞ , то, соответственно этому, при перегруппировке членов индексы и будут изменяться до бесконечности, только m начиная с $m=1$, а n с $n=m$. Тогда

$$\begin{aligned} \int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = & \left(1 + \operatorname{sign} \alpha \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!! (2n - 1)!!}{(2n)!!^2} v^n \right) \varphi - \\ & - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(2m - 2)!!}{(2m - 1)!!} \left(\operatorname{sign} \alpha \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!! (2n - 1)!!}{(2n)!!^2} v^n \right) \sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi. \end{aligned}$$

Или в сокращенной форме

$$\int_0^\varphi (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = (1 - D_1^{(\alpha)})\varphi + \sum_{m=1}^{\infty} D_m^{(\alpha)} \sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi; \quad (4)$$

$$D_m^{(\alpha)} = \frac{(2m-2)!!}{(2m-1)!!} \text{sign } \alpha \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-\alpha-2)!!(2n-1)!!}{(2n)!!^2} v^n.$$

На основе зависимости (4) образуется рекуррентная формула

$$D_{m+1}^{(\alpha)} = \frac{2m}{2m+1} D_m^{(\alpha)} + \text{sign } \alpha (-1)^{m+1} \frac{(2m-\alpha-2)!!}{(2m+1)(2m)!!} v^m. \quad (5)$$

В частном случае при $\alpha=1$ из (4), (5) следует

$$\int_0^\varphi \sqrt{1 + v \sin^2 \varphi} d\varphi = (1 - D_1^{(1)})\varphi + \sum_{m=1}^{\infty} D_m^{(1)} \sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi;$$

$$D_m^{(1)} = \frac{(2m-2)!!}{(2m-1)!!} \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-3)!!(2n-1)!!}{(2n)!!^2} v^n;$$

$$D_{m+1}^{(1)} = \frac{2m}{2m+1} D_m^{(1)} + (-1)^{m+1} \frac{(2m-3)!!}{(2m+1)(2m)!!} v^m, \quad m=1(1)\infty.$$

Аналогично, для $\alpha=-3$ получаем

$$\int_0^\varphi (1 + v \sin^2 \varphi)^{-3/2} d\varphi = (1 - D_1^{(-3)})\varphi + \sum_{m=1}^{\infty} D_m^{(-3)} \sin^{2m-1} \varphi \cos \varphi;$$

$$D_m^{(-3)} = \frac{(2m-2)!!}{(2m-1)!!} \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{(2n+1)!!(2n-1)!!}{(2n)!!^2} v^n;$$

$$D_{m+1}^{(-3)} = \frac{2m}{2m+1} D_m^{(-3)} + (-1)^m \frac{(2m-1)!!}{(2m)!!} v^m.$$

Другие разновидности алгоритмов, используемых в вычислительной практике, можно теперь получить двумя способами. Точно так же путем трудоемкой операции интегрирования (1) по другим закономерностям. Или путем тождественных тригонометрических преобразований полученного решения (4).

Для выражения эллиптических интегралов по степеням тригонометрических функций применяются и двойные аргументы. Так, выразив в равенстве (4) произведение $\sin \varphi \cos \varphi = (\sin 2\varphi)/2$, получим

$$\int_0^\varphi (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = (1 - D_1^{(\alpha)})\varphi + \sin 2\varphi \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2} D_m^{(\alpha)} \sin^{2m-2} \varphi. \quad (6)$$

Оставшиеся в (6) четные степени синуса по тождеству

$$\sin^{2n} \varphi = \sum_{m=0}^n (-1)^m \frac{(2n)!!}{(2m)!!(2n-2m)!!} \cos^{2m} \varphi$$

приводятся к степеням $\cos \varphi$, а тождеством

$$\sin^{2n} \varphi = \sum_{m=0}^n (-1)^m \frac{n!}{(2m)!!(2n-2m)!!} \cos^m 2\varphi$$

преобразуются к степеням косинуса двойного угла.

Этот же результат получается интегрированием (1) по формуле

$$\int_0^{\varphi} \sin^{2n} \varphi d\varphi = \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \left(\varphi - \sin 2\varphi \sum_{m=0}^{n-1} (-1)^m O_m \cos^m 2\varphi \right);$$

$$O_m = \sum_{k=m}^{n-1} \frac{(2k)!!^2}{2^{k+1} (2k+1)!! (2m)!! (2k-2m)!!}.$$

Откуда

$$\int_0^{\varphi} \sin^2 \varphi d\varphi = \frac{1}{2} \varphi - \frac{1}{4} \sin 2\varphi;$$

$$\int_0^{\varphi} \sin^4 \varphi d\varphi = \frac{3}{8} \varphi - \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{16} \cos 2\varphi \right) \sin 2\varphi;$$

$$\int_0^{\varphi} \sin^6 \varphi d\varphi = \frac{5}{16} \varphi - \left(\frac{11}{48} - \frac{3}{32} \cos 2\varphi + \frac{1}{48} \cos^2 2\varphi \right) \sin 2\varphi;$$

$$\int_0^{\varphi} \sin^8 \varphi d\varphi = \frac{35}{128} \varphi - \left(\frac{5}{24} - \frac{27}{256} \cos 2\varphi + \frac{1}{24} \cos^2 2\varphi - \frac{1}{128} \cos^3 2\varphi \right) \sin 2\varphi.$$

Для преобразования (4) к кратным аргументам функции $\sin \varphi$ перепишем его в виде

$$\int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = (1 - D_1^{(\alpha)}) \varphi + \sum_{i=1}^{\infty} D_i^{(\alpha)} \sin^{2i-1} \varphi \cos \varphi;$$

$$D_i^{(\alpha)} = \frac{(2i-2)!!}{(2i-1)!!} \text{sign } \alpha \sum_{n=i}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-\alpha-2)!! (2n-1)!!}{(2n)!!^2} v^n. \quad (7)$$

С помощью зависимости

$$\sin^{2i-1} \varphi \cos \varphi = \sum_{m=1}^i (-1)^{m+1} \frac{2m}{i} \frac{(2i-1)!! (2i)!!}{(2i-2m)!! (2i+2m)!!} \sin 2m\varphi$$

равенство (7) представляется в форме

$$\int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = (1 - D_1^{(\alpha)}) \varphi + \sum_{i=1}^{\infty} D_i^{(\alpha)} \sum_{m=1}^i (-1)^{m+1} \frac{2m}{i} \frac{(2i-1)!! (2i)!! \sin 2m\varphi}{(2i-2m)!! (2i+2m)!!} =$$

$$= (1 - D_1^{(\alpha)}) \varphi + \sum_{m=1}^{\infty} \sin 2m\varphi \left(\sum_{i=m}^{\infty} (-1)^{m+1} \frac{2m}{i} \frac{(2i-1)!! (2i)!! D_i^{(\alpha)}}{(2i-2m)!! (2i+2m)!!} \right)$$

или сокращенно

$$\int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = (1 - D_1^{(\alpha)}) \varphi + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^{(\alpha)} \sin 2m\varphi;$$

$$A_m^{(\alpha)} = \sum_{i=m}^{\infty} (-1)^{m+1} \frac{2m}{i} \frac{(2i-1)!! (2i)!! D_i^{(\alpha)}}{(2i-2m)!! (2i+2m)!!} =$$

$$= \sum_{i=m}^{\infty} (-1)^{m+1} \frac{2m}{i} \frac{(2i-1)!! (2i)!!}{(2i-2m)!! (2i+2m)!!} \frac{(2i-2)!!}{(2i-1)!!} \text{sign } \alpha \sum_{n=i}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-\alpha-2)!! (2n-1)!!}{(2n)!!^2} v^n =$$

$$= \text{sign } \alpha \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n+1} \frac{(2n-\alpha-2)!! (2n-1)!!}{m (2n-2m)!! (2n+2m)!!} v^n.$$

Так как $A_0^{(\alpha)} = 1 - D_1^{(\alpha)}$, то

$$\int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = A_0^{(\alpha)} \varphi + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^{(\alpha)} \sin 2m\varphi; \quad (8)$$

$$A_m^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!!(2n - 1)!!}{(2n - 2m)!!(2n + 2m)!!} v^n, \quad m = 0(1)\infty.$$

Тригонометрический ряд (8) выводится и интегрированием (1) по формуле

$$\int_0^{\varphi} \sin^{2n} \varphi d\varphi = \frac{(2n - 1)!!}{(2n)!!} \varphi + \sum_{m=1}^n (-1)^m \frac{(2n - 1)!!(2n)!!}{(2n - 2m)!!(2n + 2m)!!} \frac{\sin 2m\varphi}{m}.$$

Таким образом, многообразие алгоритмов обусловлено не только применяемыми методами для нахождения первообразных, как это трактуется в научной литературе, но и свойствами тригонометрических функций, с помощью которых от одного вида выражения интеграла, как следствие, получаются другие разновидности. Из выполненного анализа следует, что для вывода алгоритмов более рациональным является второй подход при условии, что исходный ряд для последующих преобразований получается наиболее простым способом.

Поэтому в качестве начального разложения эллиптического радикала примем [1]

$$(1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} = A_0^{(\alpha)} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} A_m^{(\alpha)} \cos 2m\varphi; \quad (9)$$

$$A_m^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!!(2n - 1)!!}{(2n - 2m)!!(2n + 2m)!!} v^n, \quad m = 0(1)\infty,$$

первообразные которого находятся посредством легкой операции

$$\int_0^{\varphi} \cos 2m\varphi d\varphi = \frac{1}{2m} \sin 2m\varphi.$$

Интегрированием (9) получаем результат (8) с добавочным выражением для коэффициента $A_m^{(\alpha)}$:

$$\int_0^{\varphi} (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = A_0^{(\alpha)} \varphi + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^{(\alpha)} \frac{\sin 2m\varphi}{m};$$

$$A_m^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n+1} \frac{(2n - \alpha - 2)!!(2n - 1)!!}{(2n - 2m)!!(2n + 2m)!!} v^n =$$

$$= \frac{1}{(1 - \dot{k}_1)^\alpha} \sum_{n=m}^{\infty} \frac{(2n - 2m - \alpha - 2)!!(2n - \alpha - 2)!!}{(2n - 2m)!!(2n)!!} \dot{k}_1^{2n-m}; \quad m = 0(1)\infty, \quad (10)$$

с учетом зависимости $\dot{k}_1 = \text{sign } v \frac{\sqrt{1+v-1}}{\sqrt{1+v+1}}$.

Следует отметить, что общая зависимость (10) сохраняется при всех α , а изменяются только выражения коэффициентов:

$$A_m^{(1)} = \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n+1} \frac{(2n - 3)!!(2n - 1)!!}{(2n - 2m)!!(2n + 2m)!!} v^n = \frac{1}{1 - \dot{k}_1} \sum_{n=m}^{\infty} \frac{(2n - 2m - 3)!!(2n - 3)!!}{(2n - 2m)!!(2n)!!} \dot{k}_1^{2n-m};$$

$$A_m^{(-1)} = \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n} \frac{(2n - 1)!!(2n - 1)!! v^n}{(2n - 2m)!!(2n + 2m)!!} = (1 - \dot{k}_1) \sum_{n=m}^{\infty} \frac{(2n - 2m - 1)!!(2n - 1)!!}{(2n - 2m)!!(2n)!!} \dot{k}_1^{2n-m};$$

$$A_m^{(-3)} = \sum_{n=m}^{\infty} (-1)^{m+n} \frac{(2n+1)!!(2n-1)!!v^n}{(2n-2m)!!(2n+2m)!!} = (1-k_1)^3 \sum_{n=m}^{\infty} \frac{(2n-2m+1)!!(2n+1)!!}{(2n-2m)!!(2n)!!} k_1^{2n-m}.$$

После этого все полученные ранее разложения, более эффективно находятся из (10) по тождествам

$$\sin 2m\varphi = \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} \frac{(2m+2k-2)!!}{(2m-2k)!!(2k-1)!} \sin^{2k-1} \varphi \cos \varphi; \quad (11)$$

$$\sin 2m\varphi = \sum_{k=1}^m (-1)^{k+m} \frac{(2m+2k-2)!!}{(2m-2k)!!(2k-1)!} \cos^{2k-1} \varphi \sin \varphi; \quad (12)$$

$$\sin 2m\varphi = \sum_{k=1}^{E\left(\frac{m+1}{2}\right)} (-1)^{k+1} \frac{(2m-2k)!!}{(2k-2)!!(m-2k+1)!} \sin 2\varphi (\cos 2\varphi)^{m-2k+1}, \quad (13)$$

где $E(n)$ — целая часть числа $n=(m+1)/2$.

Для вычисления определенного интеграла $\int_0^{\varphi} (1-k^2 \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi$ К. Павлов [7] приводит четыре первых члена разложения с параметром k_1 , совпадающими при $\alpha=1$ с выведенными Ф. Гельмертом [8]. Однако общего члена ряда не получает и не проводит исследований и сравнительного анализа.

Если в разложении (10) сохранить $n+1$ первых членов, а в коэффициентах удерживать величины по v^n включительно, то получим отрезок ряда

$$\int_0^{\varphi} (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = G_0^{(\alpha)} \varphi + G_1^{(\alpha)} \sin 2\varphi + G_2^{(\alpha)} \sin 4\varphi + \dots + G_n^{(\alpha)} \sin 2n\varphi, \quad (14)$$

где $G_n^{(\alpha)} = A_n^{(\alpha)}/n$.

С помощью тождеств (11)–(13) формула (14) преобразуется соответственно к следующим видам:

$$\int_0^{\varphi} (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = (1-D_1^{(\alpha)}) \varphi + D_1^{(\alpha)} \sin \varphi \cos \varphi + \dots + D_n^{(\alpha)} \sin^{2n-1} \varphi \cos \varphi; \quad (15)$$

$$\int_0^{\varphi} (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = B_0^{(\alpha)} \varphi + B_1^{(\alpha)} \sin \varphi \cos \varphi + \dots + B_n^{(\alpha)} \sin \varphi \cos^{2n-1} \varphi; \quad (16)$$

$$\int_0^{\varphi} (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = F_0^{(\alpha)} \varphi + F_1^{(\alpha)} \sin \varphi + F_2^{(\alpha)} \sin 2\varphi \cos 2\varphi + \dots + F_n^{(\alpha)} \sin 2\varphi \cos^{n-1} 2\varphi. \quad (17)$$

Полученные этим способом алгоритмы (14)–(17) будут тождественными между собой и определять величину обобщенного эллиптического интеграла с одинаковой точностью. Однако скорости убывания их членов будут разными, и зависеть от порядкового номера n и величины α .

Как ранее было установлено [1], во всех видах разложений (14)–(17) между их общими членами $u_n^{(\alpha)}$ при $\alpha=1$ и при отрицательных $\alpha=-1; -3$ сохраняется закономерность

$$u_n^{(\alpha)} = -\frac{(2n-\alpha-2)!!}{(2n-3)!!} u_n^{(1)}. \quad (18)$$

Из (18) получаем соотношения

$$u_n^{(-1)} = (1-2n)u_n^{(1)}; \quad u_n^{(-3)} = (1-4n^2)u_n^{(1)},$$

показывающие, что в каждом разложении последний член при отрицательных показателях $\alpha=-1$

и $\alpha = -3$ принимает значения, которые по абсолютной величине больше $|u_n^{(1)}|$ соответственно в $2n-1$ и $4n^2-1$ раз.

Сравнительные характеристики скоростей убывания разложений (14)–(17) в зависимости от n можно получить по отношениям приближенных величин коэффициентов последних членов. Действительно, на основе

$$G_n^{(\alpha)} = -\text{sign } \alpha \frac{(2n-\alpha-2)!!(2n-1)!!}{n(4n)!!} v^n \text{ и } D_n^{(\alpha)} = (-1)^n \text{sign } \alpha \frac{(2n-\alpha-2)!!}{2n(2n)!!} v^n$$

получаем

$$D_n^{(\alpha)} = (-1)^{n+1} 2^{2n-1} G_n^{(\alpha)}. \quad (19)$$

Таким же способом устанавливаем соотношения

$$B_n^{(\alpha)} = 2^{2n-1} G_n^{(\alpha)}; \quad F_n^{(\alpha)} = 2^{n-1} G_n^{(\alpha)}, \quad (20)$$

справедливые для любого α и выбранного n .

Из равенств (19), (20) следует, что среди коэффициентов $|D_n^{(\alpha)}|$, $|B_n^{(\alpha)}|$, $|F_n^{(\alpha)}|$, $|G_n^{(\alpha)}|$ алгоритмов (14)–(17) наименьшую величину имеет коэффициент $|G_n^{(\alpha)}|$ отрезка ряда Фурье (14) по сравнению со степенными разложениями. Эта закономерность сохраняется и для величин самих членов.

Например, так как $|D_n^{(\alpha)}| > |G_n^{(\alpha)}|$, а $\max |\sin 2n\varphi| = 1$; $\max |\sin^{2n-1} \varphi \cos \varphi| = \max \frac{1}{\sqrt{2n-1}} \left(1 - \frac{1}{2n}\right)^n = \frac{1}{2}$, то $\max |D_n^{(\alpha)} \sin^{2n-1} \varphi \cos \varphi| > \max |G_n^{(\alpha)} \sin 2n\varphi|$ при $n > 1$.

При построении рабочих формул обычно последними членами в разложениях (14)–(17) пренебрегают и используют их величины для оценки погрешностей укороченных алгоритмов. На основании выполненных исследований заключаем, что полученные таким способом алгоритмы не являются равноточными. С наименьшей погрешностью будет определяться результат по отрезку ряда Фурье (14) без последнего члена, при этом наивысшая точность достигается для обобщенного эллиптического интеграла с показателем $\alpha = 1$.

И снова, для более рационального использования современной вычислительной техники, полученный алгоритм по тригонометрическим выражениям (11)–(13) приводится к тождественным ему степенным разложениям.

Приведем пять первых членов ряда (14) на основе которого формируются формулы для решения геодезических задач

$$\int_0^\varphi (1 + v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = G_0^{(\alpha)} \varphi + G_1^{(\alpha)} \sin 2\varphi + G_2^{(\alpha)} \sin 4\varphi + G_3^{(\alpha)} \sin 6\varphi + G_4^{(\alpha)} \sin 8\varphi, \quad (21)$$

где

$$G_0^{(\alpha)} = A_0^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \left[-(-\alpha-2)!! + \frac{(-\alpha)!!}{4} v - \frac{3}{64} (2-\alpha)!! v^2 + \frac{5}{768} (4-\alpha)!! v^3 - \frac{35}{49152} (6-\alpha)!! v^4 \right] =$$

$$= \frac{1}{(1-k_1)^\alpha} \left((-\alpha-2)!!^2 + \frac{(-\alpha)!!^2}{4} k_1 + \frac{(2-\alpha)!!^2}{64} k_1^4 \right);$$

$$G_1^{(\alpha)} = A_1^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \left[-\frac{(-\alpha)!!}{8} v + \frac{1}{32} (2-\alpha)!! v^2 - \frac{5}{1024} (4-\alpha)!! v^3 + -\frac{7}{12288} (6-\alpha)!! v^4 \right] =$$

$$= \frac{1}{(1-k_1)^\alpha} \left(\frac{(-\alpha)!!(-2-\alpha)!!}{2} k_1 + \frac{(-\alpha)!!(2-\alpha)!!}{16} k_1^3 \right);$$

$$\begin{aligned}
 G_2^{(\alpha)} &= \frac{1}{2} A_2^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \left[-\frac{(2-\alpha)!!}{256} v^2 + \frac{(4-\alpha)!!}{1024} v^3 - \frac{7(6-\alpha)!!}{49152} v^4 \right] = \\
 &= \frac{1}{(1-\dot{k}_1)^\alpha} \left(\frac{(-\alpha-2)!!(2-\alpha)!!}{16} \dot{k}_1^2 + \frac{(-\alpha)!!(4-\alpha)!!}{192} \dot{k}_1^4 \right); \\
 G_3^{(\alpha)} &= \frac{1}{3} A_3^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \left(-\frac{(4-\alpha)!!}{9216} v^3 + \frac{(6-\alpha)!!}{36864} v^4 \right) = \frac{1}{(1-\dot{k}_1)^\alpha} \left(\frac{(-\alpha-2)!!(4-\alpha)!!}{144} \dot{k}_1^3 \right); \\
 G_4^{(\alpha)} &= \frac{1}{4} A_4^{(\alpha)} = \text{sign } \alpha \left(-\frac{(6-\alpha)!!}{393216} v^4 \right) = \frac{1}{(1-\dot{k}_1)^\alpha} \left(\frac{(-\alpha-2)!!(6-\alpha)!!}{1536} \dot{k}_1^4 \right). \quad (22)
 \end{aligned}$$

Если в равенстве (21) отбросить пятый член, то для решения задач получим алгоритм

$$\int_0^\varphi (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = G_0^{(\alpha)} \varphi + G_1^{(\alpha)} \sin 2\varphi + G_2^{(\alpha)} \sin 4\varphi + G_3^{(\alpha)} \sin 6\varphi. \quad (23)$$

Погрешность этой формулы на поверхности эллипсоида с большой полуосью a и первым эксцентриситетом e в линейной мере составит

$$\Delta = |a G_4^{(\alpha)} \sin 8\varphi| \leq a |G_4^{(\alpha)}| = a e^8 (6-\alpha)!!/393216. \quad (24)$$

Ее наибольшая величина достигается при $\alpha = -3$:

$$\max \Delta = 6380000 \text{ м} \cdot 0,00669^4 \cdot 945/393216 = 0,00003 \text{ м} = 0,03 \text{ мм}.$$

С этой точностью алгоритм (23) по тождествам (11)–(13), с принятыми в (15)–(17) обозначениями коэффициентов, преобразуется к степенному виду:

$$\int_0^\varphi (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = D_0^{(\alpha)} \varphi + \sin \varphi \cos \varphi \left[D_1^{(\alpha)} + \sin^2 \varphi (D_2^{(\alpha)} + D_3^{(\alpha)} \sin^2 \varphi) \right]; \quad (25)$$

$$\int_0^\varphi (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = B_0^{(\alpha)} \varphi + \sin \varphi \cos \varphi \left[B_1^{(\alpha)} + \cos^2 \varphi (B_2^{(\alpha)} + B_3^{(\alpha)} \cos^2 \varphi) \right]; \quad (26)$$

$$\int_0^\varphi (1+v \sin^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = F_0^{(\alpha)} \varphi + \sin 2\varphi \left[F_1^{(\alpha)} + \cos 2\varphi (F_2^{(\alpha)} + F_3^{(\alpha)} \cos 2\varphi) \right]. \quad (27)$$

Из зависимостей (22) следует, что к более рациональному вычислению интеграла (23) приводят выражения коэффициентов с параметром \dot{k}_1 . Однако преобразования формулы (23) к степенным видам (25), (26) усложняют структуру коэффициентов с \dot{k}_1 и увеличивают вдвое число слагаемых в каждом члене. Например,

$$\begin{aligned}
 D_1^{(\alpha)} &= 2G_1^{(\alpha)} + 4G_2^{(\alpha)} + 6G_3^{(\alpha)} = \frac{1}{(1-\dot{k}_1)^\alpha} \left[(-\alpha)!!(-\alpha-2)!! \dot{k}_1 + \frac{(-\alpha-2)!!(-\alpha+2)!!}{4} \dot{k}_1^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(-\alpha-2)!!(-\alpha+2)!!(1-\alpha)}{6} \dot{k}_1^3 + \frac{(-\alpha)!!(-\alpha+4)!!}{48} \dot{k}_1^4 \right].
 \end{aligned}$$

Прежнее строение коэффициентов сохраняется в алгоритме (27) и его целесообразно использовать для вычислений, в котором

$$\begin{aligned}
 F_0^{(\alpha)} &= G_0^{(\alpha)}; \\
 F_1^{(\alpha)} &= G_1^{(\alpha)} - G_3^{(\alpha)} = \frac{1}{(1-k_1)^\alpha} \left[\frac{(-\alpha)!!(-\alpha-2)!!}{2} k_1 - \frac{(-\alpha-2)!!(-\alpha+2)!!(2\alpha+1)}{36} k_1^3 \right]; \\
 F_2^{(\alpha)} &= 2G_2^{(\alpha)} = \frac{1}{(1-k_1)^\alpha} \left[\frac{(-\alpha-2)!!(-\alpha+2)!!}{8} k_1^2 + \frac{(-\alpha)!!(-\alpha+4)!!}{96} k_1^4 \right]; \\
 F_3^{(\alpha)} &= 4G_3^{(\alpha)} = \frac{1}{(1-k_1)^\alpha} \left[\frac{(-\alpha-2)!!(-\alpha+4)!!}{36} k_1^3 \right].
 \end{aligned} \tag{28}$$

Как отмечалось ранее, формула (27) с коэффициентами (28) при $\alpha = -3$ определяет интеграл с погрешностью $\Delta = 0,03$ мм. В соответствии с (18) погрешность этого алгоритма при $\alpha = 1$ уменьшается в 63 раза и составляет $\Delta = 0,0005$ мм.

Переход от эллиптического интеграла с показателем $\alpha = -3$ к более точному с показателем $\alpha = 1$ осуществляется подстановкой $\operatorname{tg} \varphi_1 = \sqrt{1+v} \operatorname{tg} \varphi$.

В этом случае

$$\int_0^\varphi (1+v \sin^2 \varphi)^{-3/2} d\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+v}} \int_0^{\varphi_1} \left(1 - \frac{v}{1+v} \sin^2 \varphi_1 \right)^{1/2} d\varphi_1.$$

Полученные результаты легко подтверждаются алгоритмами, используемыми при вычислениях длины дуги меридиана [9].

Если в равенстве (10) заменить α на $\pi/2 + \varphi$, то эта подстановка приводит к эллиптическому интегралу вида

$$\int_0^\varphi (1+v \cos^2 \varphi)^{\alpha/2} d\varphi = A_0^{(\alpha)} \varphi + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m A_m^{(\alpha)} \frac{\sin 2m\varphi}{m} \tag{29}$$

с прежними выражениями коэффициентов $A_i^{(\alpha)}$. Поэтому все свойства, выведенные на основе эллиптического интеграла (10), будут справедливыми и для эллиптического интеграла (29).

Выполненные исследования позволяют априори указать достоинства и недостатки рассматриваемых алгоритмов, указать пути их дальнейшего совершенствования.

Полученные алгоритмы можно использовать не только для вычисления длин геодезических линий, но и других кривых на поверхности эллипсоида (нормального и геоцентрического сечений, локсодромии).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Медведев П.А.* Обобщенная математическая модель функций, применяемых в сфероидической геодезии // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – №3. – С. 17–21.
2. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т.2. – М.: Наука, 1969. – 800 с.
3. *Ганьшин В.Н.* Геометрия земного эллипсоида. – М.: Недра, 1967. – 116 с.
4. *Oriani B.* Elementi di trigonometria sferoidica // Memoire dell'Istituto nazionale Italiano. Classe di Fisica e Matematica. Tomo primo. Parte prima. – Bologna. – 1806. – P. 118 – 198.
5. *Ветчинкин В.П.* Новые формулы и таблицы эллиптических интегралов и функций. – М.: Военно-воздушная академия РККА, 1935. – 47 с.
6. *Градиштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.
7. *Павлов К.* Едно изследване върху определянето на елипсоидните разстояния // Изв. Гл. упр. геодезии и картографии, – София, 1975. – №1. – С. 3–9.
8. *Гельмерт Ф.Р.* Математические и физические теории высшей геодезии. В 2 т. Т.1. Математические теории. – М.: Геодезиздат, 1962. – 408 с.
9. *Макаров А.П., Медведев П.А.* Вычисление длины дуги меридиана методом проективной геометрии // Геодезия и картография. – 2008. – № 11. – С. 16 – 23.

Принята к печати 24 марта 2016 г.

ИНТЕРВАЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОДЕЗИИ

©2016 М.Д. Герасименко^{1,2}, Н.В. Шестаков^{1,2}

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

²Институт прикладной математики ДВО РАН, Россия
mdg@iam.dvo.ru

Аннотация. Рассмотрены элементарные сведения из интервальной математики и возможности ее применения в целях повышения достоверности результатов геодезических вычислений. Каких-либо указаний на распределение приближенных чисел внутри заданных интервалов не требуется. Интервальный анализ может быть применен при решении систем уравнений, анализе возможного влияния неизвестных систематических ошибок измерений, ошибок задания весов измерений и др.

Ключевые слова: интервальные числа, границы интервалов, арифметические операции, системы линейных уравнений, систематические ошибки

INTERVAL MATHEMATICS AND PROSPECTS OF ITS APPLICATION IN GEODESY

©2016 Gerasimenko M.^{1,2}, Shestakov N.^{1,2}

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

²Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Department), Russia
mdg@iam.dvo.ru

Abstract. Elementary data from interval mathematics and capabilities of its application for reliability improvement of geodetic calculation results are considered. Any information about distribution of interval numbers approximate values within the predefined intervals is not required. The interval analysis can be applied to solve equation systems, to analyze possible influence of unknown systematic errors of measurements and measurement weight errors, etc.

Keywords: interval numbers, limit of intervals, arithmetic's operations, systems of linear equations, systematic errors

Введение. Широко используемая в настоящее время в нашей стране и за рубежом классическая теория математической обработки геодезических измерений главным образом базируется на положениях математической статистики и теории вероятностей. Основная числовая характеристика точности результатов измерений и их функций — средняя квадратическая ошибка, на основе которой могут быть получены вероятные ошибки и доверительные интервалы, в пределах которых с заданной доверительной вероятностью должен находиться результат математической обработки. В силу своей вероятностной природы классический подход всегда предполагает, что существует некоторая вероятность того, что значение искомой величины (величин) может оказаться вне определенного для нее доверительного интервала. В связи с увеличением требований к безопасности строительства и эксплуатации сложных технических и инженерных систем, в ходе которых широко применяются геодезические методы, значительный интерес представляет использование аппарата интервальной математики, позволяющего получать интервалы, в которых

гарантированно лежат оценки определяемых параметров.

Интервальная математика (интервальный анализ) как раздел в современной вычислительной науке появился лишь в XX в., причем ее оформление в самостоятельную научную математическую дисциплину стало возможным лишь с широким распространением вычислений на современных ЭВМ. Объектами интервальной математики являются так называемые интервальные числа, задаваемые интервалами их возможных значений без каких-либо указаний на распределение числа внутри заданного интервала, т.е. интервальные числа содержат минимальную информацию о неопределенном числе. При этом арифметические операции определяются таким образом, что точный результат соответствующей операции гарантированно находится внутри вычисляемых границ. Причем, в отличие от традиционного численного анализа, в «интервальных алгоритмах» широко используются различные теоретико-множественные операции с целью уточнения границ области, в пределах кото-

рой находится неизвестное точное значение искомой величины. Поэтому эти числа представляют для различных приложений большой интерес в связи с практической потребностью повысить достоверность результатов, получаемых при вычислениях на ЭВМ.

Первая специализированная монография по интервальному анализу [1] появилась лишь в 1966 г. В России и СССР историю интервальной математики можно формально отсчитывать, начиная с двадцатых годов прошлого века, когда выдающийся отечественный педагог и математик В.М. Брадис, автор общеизвестных школьных математических таблиц, начал активно пропагандировать так называемый *метод границ*, гарантирующий пределы попадания точного значения вычисляемого результата (см., например, сайт <http://www.nsc.ru/interval/index.php?j=Introduction/history>). Практически же начало отечественных исследований по интервальной математике связывают с опубликованием в 1962 г. статьи Л.В. Канторовича [2], обозначившего эту тематику как приоритетную для нашей вычислительной науки. В настоящее время с этой дисциплиной можно познакомиться по книгам [3–6].

Несмотря на значительные научные и практические результаты, полученные в последние годы в данной области вычислительной математики, методы и технологии этой научной дисциплины еще не прошли необходимой широкой практической апробации. В полной мере это относится к геодезии и, особенно, отечественной. Наиболее известные и доступные результаты по применению интервальной математики приведены в работах немецких исследователей Schön S. и Kutterer H. [7–9] для исследования влияния систематических ошибок на результаты измерений, а также при оптимальном проектировании деформационных геодезических сетей. В отечественной геодезической литературе даже упоминаний о существовании и тем более практическом применении интервальной математики нами не обнаружено.

Краткие сведения из интервальной арифметики. Условимся рассматривать конечные вещественные интервалы $[a, b]$, $a \leq b$. Операции над ними определяются следующим образом [3–6]:

сложение: $[a, b] + [c, d] = [a + c, b + d]$;

вычитание: $[a, b] - [c, d] = [a - d, b - c]$;

умножение: $[a, b] \times [c, d] = [\min(ac, ad, bc, bd), \max(ac, ad, bc, bd)]$;

деление: $[a, b] / [c, d] = [\min(a/c, a/d, b/c, b/d), \max(a/c, a/d, b/c, b/d)]$.

Умножение интервала на константу:

$$k[x_1, x_2] = \begin{cases} [kx_1, kx_2], & k \geq 0; \\ [kx_2, kx_1], & k < 0. \end{cases}$$

Из определения видно, что интервал-сумма содержит всевозможные суммы чисел из интервалов-слагаемых и определяет границы множества таких сумм. Аналогично трактуются прочие действия. Отметим, что операция деления определена только в том случае, когда интервал-делитель не содержит нуля. Сложение и умножение интервалов коммутативны и ассоциативны. Дистрибутивное свойство существует в ослабленном виде: $x(y+z) \in xy+xz$.

Вырожденные интервалы, у которых начало и конец совпадают, отождествляются с обычными вещественными числами. Для них данные выше определения совпадают с классическими арифметическими действиями. В случае линейных алгебраических уравнений $Ax=b$ интервальная матрица коэффициентов и вектор свободных членов удобно представить в виде $\underline{A} \leq A \leq \bar{A}$, $\underline{b} \leq b \leq \bar{b}$, причем матричные и векторные неравенства понимаются поэлементно.

Численные примеры. Приведем несколько элементарных численных примеров, демонстрирующих применение основ интервальной математики для решения простейших геодезических задач и позволяющих производить все вычисления «в уме» без применения какой-либо вычислительной техники. Для простоты в примерах размерности всех величин опущены, что не нарушает общности объяснений.

Пример 1. Пусть выполнены два равноточных измерения расстояния d_1 и d_2 . В обоих случаях получены одинаковые значения измеряемой величины 100 единиц, например, метров. Предположим, что случайная (грубая) ошибка этих измерений по абсолютной величине не превосходит единицы. В этом случае интервал, в котором заключены все возможные значения измеряемой величины $d_i = [100 - 1, 100 + 1] = [99, 101]$, $i=1,2$. Применяя аппарат интервальной математики и учитывая равноточность измерений, значение искомого расстояния равно $d = (d_1 + d_2) / 2 = [99, 101]$.

Решая эту задачу *формально* классическим методом и предполагая, что принятая выше интервальная грубая ошибка измерений единица (метр, например) является средней квадратической (ее правильное значение по каким-то причинам неизвестно, а метод наименьших квадратов при наших начальных условиях формально его и не требует), приходим к результату $d=100\pm 0,7$, так как ошибка среднего арифметического в $\sqrt{2}$ раз меньше ошибки измерений.

Интервал, в котором должно лежать истинное значение определяемой величины, оказался значительно уже полученного выше. Да и смысл его иной, нежели у интервальной оценки, так как его границы определены с вероятностью 68%. Увеличение доверительной вероятности до используемых обычно в геодезической практике 95% сразу же приводит к существенному расширению возможного диапазона значений определяемой величины по сравнению с полученной интервальной оценкой, но по-прежнему не гарантирует нахождение истинного результата внутри этого интервала, так как неизвестна истинная точность измерений, распределение ошибок внутри предельного интервала. В таких условиях, как следует даже из рассмотренного элементарного примера, интервальная математика приводит к более реалистичным результатам.

Пример 2. Рассмотрим применение интервальной математики на элементарном примере уравнивания нивелирного хода, проложенного между двумя исходными реперами с номерами 1 и 2, имеющими высоты $H_1=0$ и $H_2=0$. Пусть между исходными реперами требуется определить одну марку, для чего от исходных реперов проложены равноточные нивелирные ходы с измеренными превышениями $h_1=1$ и $h_2=1$. Кроме того, предполагается, что оба измеренных превышения *могут содержать* в себе систематические ошибки до величины $\Delta h=+1$ и *максимально возможную случайную (грубую) ошибку* измерения $m=2$. Из этих предположений следует, что верхний предел измеряемых превышений не превосходит величины $\bar{h} = h + m = 3$, а нижний $\underline{h} = h - \Delta h - m = -2$, то есть интервал $-2 \leq h \leq 3$ является гарантированным диапазоном всех возможных значений обоих измеряемых превышений. Составляя систему уравнений поправок для измеренных превышений $v_i = \delta H + l_i$, $i=1,2$, где v_i — поправка к измерению; δH — поправка к приближенному значению определяемой высоты $H=0$;

$l_i = H - H_i - h_i$ — свободные члены, получаем систему нормальных уравнений $(A^T A) \delta H + A^T L = 0$. Здесь $A^T = (1 \ 1)$ — транспонированная матрица коэффициентов системы уравнений поправок, составленная из обычных вещественных чисел (они в нашем примере безошибочны), поэтому $A^T A = 2$, а интервальный вектор свободных членов уравнений поправок $L = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [-3, 2] \\ [-3, 2] \end{pmatrix}$.

Решая нормальные уравнения, получим интервальное решение

$$\delta H = -\frac{1}{2} (1 \ 1) \begin{pmatrix} [-3, 2] \\ [-3, 2] \end{pmatrix} = [-2, 3].$$

Пример 3. Пусть исходные данные рассматриваемой здесь задачи полностью повторяют условия примера 2, но дополнительно предполагается, что исходный репер 2 мог испытать опускание $\Delta H \leq 2$. В этих условиях превышение h_2 может оказаться завышенным на величину ΔH , то есть гарантированным диапазоном возможных значений измеряемого превышения h_2 будет интервал $-2 \leq h_2 \leq 5$. Для превышения h_1 он останется прежним. Тогда величина

$$\delta H = -\frac{1}{2} (1 \ 1) \begin{pmatrix} [-3, 2] \\ [-5, 2] \end{pmatrix} = [-2, 4]$$

является гарантированной оценкой поправки предварительной отметки определяемой марки как с учетом влияния возможной положительной систематической ошибки (вертикальной рефракции), так и с учетом возможного систематического уменьшения высоты исходного репера 2. Если исходные данные имеют известные оценки средних квадратических ошибок их положения, для них также можно назначить предельные значения и использовать до уравнивания для назначения предельных интервалов возможных значений измеряемых величин (нижних и верхних границ одновременно).

Выводы. Как показано выше, даже на элементарных примерах, аппарат интервальной математики вполне может быть применен для решения как теоретических, так и прикладных геодезических задач и имеет, по нашему мнению, в этой области большие перспективы. В первую очередь это относится к математической обработке и проектированию измерений при создании геодезических сетей специального назначения для строительства и эксплуатации уникальных инженерных сооружений, где требуется получать необходимые параметры с

гарантированной точностью, обеспечивающей безопасную эксплуатацию и бесперебойную работу сложного оборудования (вращающихся цементных печей, например). Другая сфера применения интервального анализа может быть связана с прогнозом и снижением рисков возникновения техногенных и природных катастроф (наблюдения за деформациями плотин ГЭС, высотных сооружений и т.п.). При этом особый интерес представляет именно проектирование измерений при наложении предельных допусков на возможные критические значения допустимых пределов возможных деформаций сооружений и механизмов, т.е. определение допустимых грубых ошибок проектируемых измерений, не приводящих к возможным катастрофическим последствиям. Широкое практическое использование интервальной математики в геодезии, конечно, требует освоения ее аппарата и довольно существенно может увеличить объем вычислений по сравнению с классическими методами. Но эти недостатки могут быть значительно устранены использованием уже имеющегося (<http://www.sbras.ru/interval/index.php?j=Programing/index>) и разра-

боткой нового геодезического программного обеспечения для современных ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moore R.E. Interval analysis. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1966. – 190 p.
2. Канторович Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибирский математический журнал. 1962. – Т. 3. – №5. – С. 701–709.
3. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. – М.: Мир, 1987. – 356 с.
4. Добронев Б.С. Интервальная математика: Учеб. пособие. – Красноярск, «СФУ», 2007. – 287 с.
5. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. – М.: Издательство XYZ, 2013. – 605 с.
6. Шокин Ю.И. Интервальный анализ. – Новосибирск: Сибирское отделение изд-ва «Наука», 1981. – 113 с.
7. Schön S., Kutterer H. Optimal design of geodetic monitoring networks by means of interval mathematics // The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements. 19 – 22 March 2001, Orange, California, USA. – 2001. – P. 362 – 371.
8. Schön S., Kutterer H. GPS monitoring networks: interval-based description of measurement uncertainties due to remaining systematics // Proc. 3rd Symp. Geodesy for Geotechnical and Structurel Engineering / 12th FIG Symp. Deform. Meas., Baden, Austria. – 2006. – CD – 10 p.
9. Schön S., Kutterer H. Using zonotopes for overestimation-free interval least-squares – some geodetic applications // Reliable Computing. – 2005. – 11. – P.137 – 155.

Принята к печати 14 марта 2016 г.
Рекомендована кафедрой геодезии,
землеустройства и кадастра ДВФУ

О НАИЛУЧШЕЙ КОНФИГУРАЦИИ ОБРАТНОЙ ЛИНЕЙНО-УГЛОВОЙ ЗАСЕЧКИ И НЕОБХОДИМОМ КОЛИЧЕСТВЕ ПУНКТОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ

©2016 И.В. Горяинов

Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
igorgoryainow@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается влияние количества исходных пунктов на точность обратной линейно-угловой засечки. Анализируются вопросы оптимальной конфигурации исходной геодезической сети в зависимости от числа исходных пунктов. Расчет точности положения определяемого пункта предложено производить по методу эквивалентных замен.

Ключевые слова: обратная линейно-угловая засечка, эквивалентные замены, обратный вес, точность геодезических работ, тахеометр, наилучшая конфигурация засечки

ON THE BEST CONFIGURATION OF THE INVERSE LINEAR-ANGULAR SERIFS AND THE REQUIRED AMOUNT OF POINTS TO ACHIEVE THE DESIRED ACCURACY

©2016 Goryainov I.

State University of Land Management, Moscow, Russia
igorgoryainow@yandex.ru

Abstract. This paper examines the impact of number of reference points on the accuracy of the inverse linear-angular serifs. Questions of the initial geodetic network optimal configuration, depending on the number of reference points are discussed. It is proposed to calculate the accuracy of determined point position via method of equivalent substitutions.

Keywords: inverse linear resection, equivalent replacement, reverses gravity, precision surveying, total station, the best configuration of the notches

В практике геодезических работ, в связи с внедрением электронных тахеометров, широкое применение получили обратные линейно-угловые засечки (ОЛУЗ). Они интенсивно используются в различных сферах прикладной геодезии, а наибольшее распространение получили при геодезическом обеспечении строительства и на маркшейдерских работах. В статье [1] нами было показано, что в ОЛУЗ величина угла засечки при определяемом пункте незначительно влияет на точность координат пунктов. Таким образом ограничения на величину угла засечки, принятые для построения угловых и линейных засечек ($30^\circ \leq \alpha_{\text{изм}} \leq 150^\circ$), для ОЛУЗ теряет свою актуальность.

Однако при использовании обратной линейно-угловой засечки остается открытым вопрос об оптимальном количестве исходных пунктов и их расположении относительно станции для определения координат точки с заданной точностью. Сегодня этот вопрос практически может быть решен следующим образом. По результатам наблюдения схемы ОЛУЗ тахеометр по методу наименьших квадратов производит строгую оценку точности, и исполнитель при необходимости дополнительно может включить пункты в схему наблюдений или выбирать более предпочтительное место для станции. Но сколько пунктов и каких именно следует дополнительно включать в схему измерений — исследований не проводилось и практических решений нет. Настоящая статья и посвящена исследованию этой проблемы.

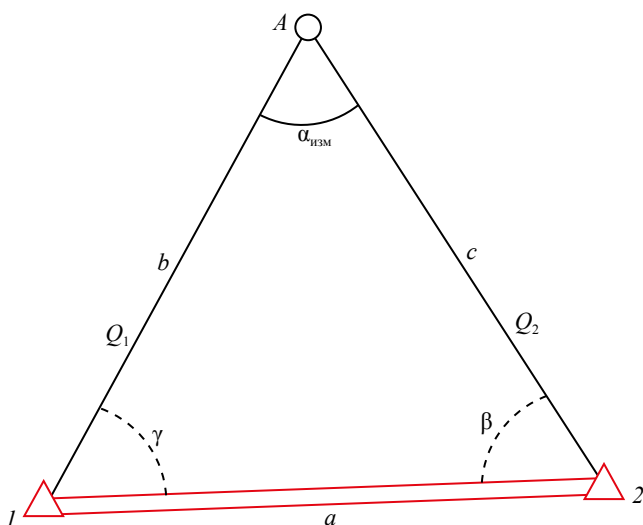


Рис. 1. Схема обратной линейно-угловой засечки с измеряемыми и вычисляемыми элементами

Для анализа точности вычисления координат станции ОЛУЗ воспользуемся методом эквивалентных замен [2]. Он позволяет просто и наглядно продемонстрировать влияние различных видов геодезических измерений на конечную точность определения координат, что весьма важно для условий стройплощадки, где ситуация меняется ежедневно, а сроки строительства являются определяющим фактором в стоимости работ.

Прежде всего исследуем влияние различных способов вычисления углов γ и β на погрешность положения определяемого пункта. Погрешность положения пункта

$$M_A = \sqrt{m_{xA}^2 + m_{yA}^2}, \quad (1)$$

где m_{xA} — средняя квадратическая погрешность (СКП) вычисления координаты x пункта A ; m_{yA} — СКП вычисления координаты y пункта A .

Будем рассматривать ОЛУЗ как пересечение в определяемой точке A двух полярных засечек с опорных пунктов I и 2 с вычисленными углами γ и β (рис. 1). С найденным решением наилучшего способа вычисления углов β и γ установим оптимальную конфигурацию схемы ОЛУЗ и зависимость её точности от числа исходных пунктов.

Обратные веса двух «полярных засечек» обозначены символами Q_1 и Q_2 соответственно (см. рис. 1). Погрешность положения пункта A может быть получена по известной в теории МНК формуле оценки точности функций [3]:

$$M_A = \mu \sqrt{Q_A}, \quad (2)$$

где μ — СКП единицы веса; Q_A — эквивалентный обратный вес определяемого пункта, вычисляемый по известным формулам А.И. Дурнева [2],

$$Q_A = \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2}; \quad (3)$$

Q_1 и Q_2 — обратные веса двух полярных засечек соответственно.

Погрешность положения одной полярной засечки (например с п. 1) определяется по известной формуле [2]:

$$M_1 = \sqrt{m_b^2 + b^2 \frac{m_{\alpha 1-2}^2 + m_\gamma^2}{\rho^2}}, \quad (4)$$

где b — сторона, измеренная электронным тахеометром; m_b — СКП измерения расстояния; m_γ — СКП вычисленного угла γ ; $m_{\alpha_{1-2}}^2$ — СКП дирекционного угла твердой линии.

Координаты исходных пунктов в дальнейшем примем безошибочными. Следовательно, СКП дирекционного угла твердой линии в формуле (4) станет равным нулю.

В связи с тем, что погрешность положения определяемого пункта A имеет размерность в линейной мере, то за единицу веса целесообразно принять линейные измерения. Обратный вес, например, угловых измерений, в этом случае может быть определен по формуле

$$Q_\gamma = \frac{m_\gamma^2}{\mu^2}. \quad (5)$$

С учетом (5) формула (4) примет вид:

$$M_1 = \mu \sqrt{1 + b^2 \frac{m_\gamma^2}{\mu^2 \rho^2}}. \quad (6)$$

В формуле (6) подкоренное выражение – есть обратный вес полярной засечки:

$$Q_1 = 1 + \frac{b^2 Q_\gamma}{\rho^2}; \quad (7)$$

$$Q_2 = 1 + \frac{c^2 Q_\beta}{\rho^2}. \quad (8)$$

Между вычисленными углами γ и β имеется, как показано [2, 4], корреляционная зависимость, которая нами не учитывается. Так как учет корреляции вычисленных углов ведет к уменьшению значений погрешности, полученные из нашего анализа выводы не теряют своей эффективности.

Погрешность вычисленного угла γ , входящая в формулы (7) и (8), может быть получена путем дифференцирования известной формулы теоремы синусов:

$$\sin \gamma = \frac{c_{\text{изм}} \sin \alpha_{\text{изм}}}{a}; \quad (9)$$

$$m_\gamma^2 = \frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[c^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{m_{c_{\text{изм}}}^2}{\rho^2} + m_c^2 + \frac{c^2}{a^2} m_a^2 \right]. \quad (10)$$

Так как сторона a является исходной (ошибки исходных данных приняты равными нулю), то формула (10) примет вид:

$$m_\gamma^2 = \frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[c^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{m_{c_{\text{изм}}}^2}{\rho^2} + m_c^2 \right]. \quad (11)$$

Погрешность угла γ может быть получена также из фундаментального уравнения трилатерации [4]

$$\frac{v_\gamma''}{\rho} = A_\gamma v_c - B_\gamma v_a - C_\gamma v_b,$$

где

$$A_\gamma = \frac{1}{h_c}; \quad B_\gamma = \sqrt{A_\gamma^2 - \frac{1}{a^2}}; \quad C_\gamma = \sqrt{A_\gamma^2 - \frac{1}{b^2}}.$$

С учетом того, что коэффициент B относится к поправке в исходную сторону ($v_a=0$), будем иметь:

$$\frac{m_\gamma^2}{\rho^2} = A_\gamma^2 m_c^2 + C_\gamma^2 m_b^2. \quad (12)$$

Так как $\mu^2 = m_b^2 = m_c^2$, то формулы (11) и (12) примут вид:

$$m_\gamma^2 = \mu^2 \frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[c^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{m_{\alpha_{\text{изм}}}^2}{\rho^2 \mu^2} + 1 \right]; \quad (13)$$

$$\frac{m_\gamma^2}{\rho^2} = \mu^2 (A_\gamma^2 + C_\gamma^2). \quad (14)$$

Подставив выражения (13), (14) в формулу (5), соответственно получим:

$$Q_\gamma = \frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[c^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{Q_{\alpha_{\text{изм}}}}{\rho^2} + 1 \right]; \quad (15)$$

$$Q_\gamma = (A_\gamma^2 + C_\gamma^2) \rho^2. \quad (16)$$

Подставим значения $Q_{\gamma_{\text{изм}}}$ (14) и (15) в формулу (3):

$$Q_A = \frac{\left(1 + \frac{b^2 \left(\frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[c^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{Q_{\alpha_{\text{изм}}}}{\rho^2} + 1 \right] \right)}{\rho^2} \right) \left(1 + \frac{c^2 \left(\frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[b^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{Q_{\alpha_{\text{изм}}}}{\rho^2} + 1 \right] \right)}{\rho^2} \right)}{\left(1 + \frac{b^2 \left(\frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[c^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{Q_{\alpha_{\text{изм}}}}{\rho^2} + 1 \right] \right)}{\rho^2} \right) + \left(1 + \frac{c^2 \left(\frac{\sin^2 \alpha_{\text{изм}}}{a^2 \cos^2 \gamma} \left[b^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_{\text{изм}} \frac{Q_{\alpha_{\text{изм}}}}{\rho^2} + 1 \right] \right)}{\rho^2} \right)}; \quad (17)$$

$$Q_A = \frac{(1 + b^2 (A_\gamma^2 + C_\gamma^2))(1 + c^2 (A_\beta^2 + B_\beta^2))}{(1 + b^2 (A_\gamma^2 + C_\gamma^2)) + (1 + c^2 (A_\beta^2 + B_\beta^2))}. \quad (18)$$

С учетом (17) и (18) построим картограммы погрешностей положения пункта A , рассчитанных по формуле (2) для различных схем ОЛУЗ (рис. 2), при следующих параметрах — длина исходной стороны $a=50$ м, погрешность измерений расстояния $m_s=2$ мм, погрешность измерения горизонтального угла $\alpha_{\text{изм}}=5''$ [5–7]. Схема определения обратного веса показана на рис. 3

Первую картограмму (рис. 4, а) построим, определяя эквивалентный обратный вес вычисленных углов β и γ по формуле (15). Вторую картограмму (рис. 4, б) построим, используя для вычисления обратного веса углов формулу (16). Построим так же третью картограмму (рис. 4, в), используя формулу (15) для Q_γ и формулу (16) для Q_β . При построении четвертой картограммы (рис. 4, г) обратный вес уг-

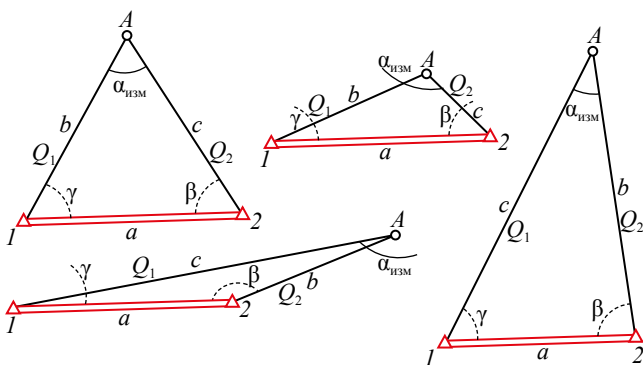


Рис. 2. Схемы обратных линейно-угловых засечек, для которых построена картограмма погрешности

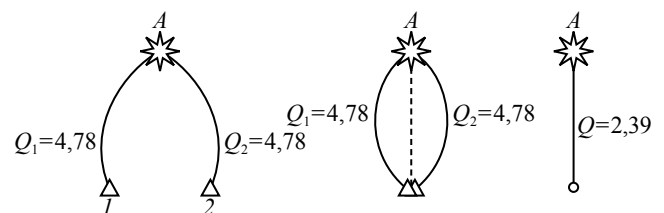
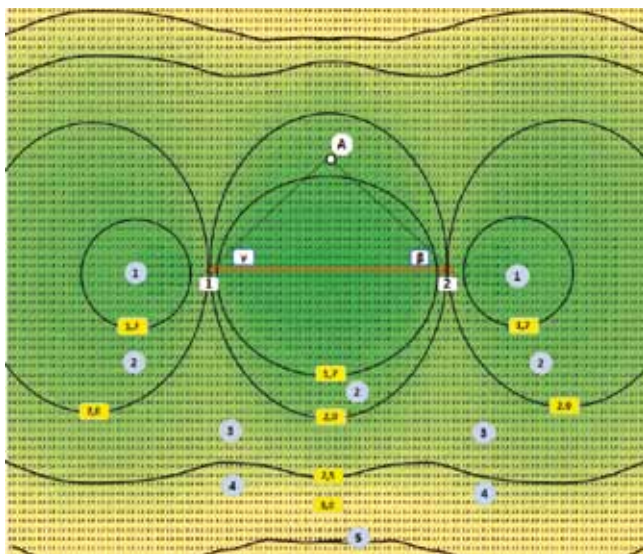
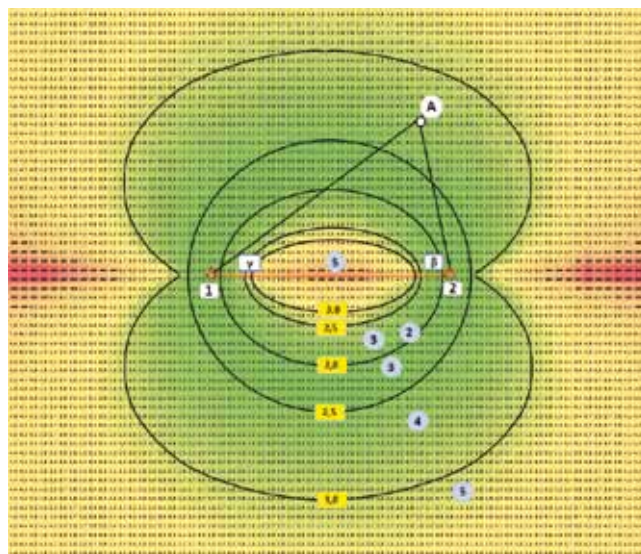


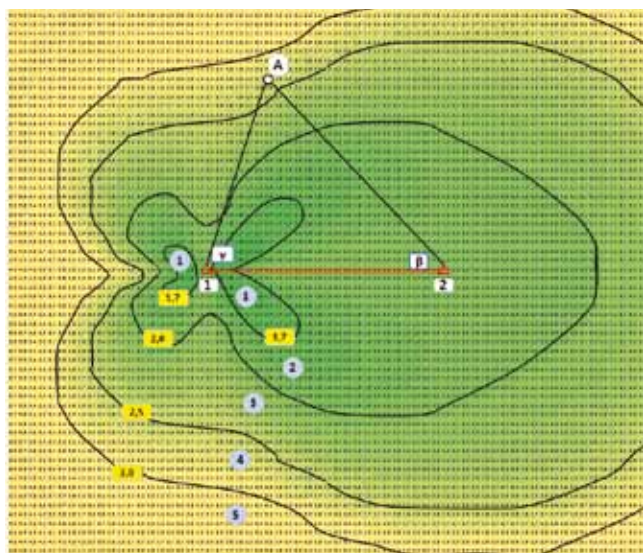
Рис. 3. Схемы определения обратного веса пункта A способом эквивалентной замены



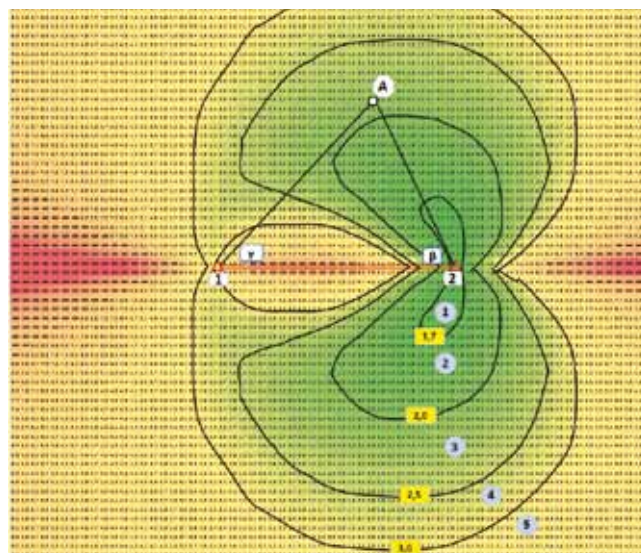
а



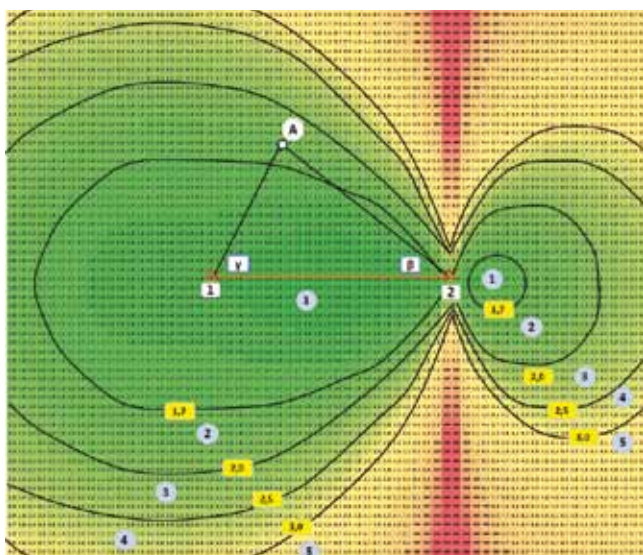
б



в



з



д

Рис. 4. Картограммы погрешностей положения пункта А:

а — при вычислении Q_γ и Q_β по формуле (15);

б — при вычислении Q_γ и Q_β по формуле (16);

в — при вычислении Q_γ по формуле (15) и Q_β по формуле (16);

з — при вычислении Q_γ по формуле (16) и Q_β по формуле (17);

д — при вычислении Q_γ по формуле (15) и Q_β по формуле (17);

△ — исходный пункт;

○ — определяемый пункт;

γ — вычисляемые углы;

1,7 — изолинии погрешностей;

2 — номер зоны погрешностей

ла γ найдем по формуле (16), а обратный вес угла β — как сумму обратных весов измеренного и вычисленного углов

$$Q_{\beta} = Q_{\alpha_{\text{изм}}} + Q_{\gamma_{\text{выч}}} \quad (17)$$

В этом случае значение угла находится по формуле $\beta = 180^{\circ} - \alpha_{\text{изм}} - \gamma_{\text{выч}}$.

При построении пятой картограммы (рис. 4, д) обратный вес угла γ найдем по формуле (15), а обратный вес угла β определим аналогично четвертой картограмме.

На первой картограмме (см. рис. 4, а) видны пять различных зон погрешностей положения определяемого пункта А. Погрешность в 1-й зоне минимальна и не превышает 85% СКП единицы веса. Во 2-й зоне находятся погрешности, составляющие от 85 до 100% СКП единицы веса. В 3-ей зоне погрешности превышают СКП единицы веса на величину от 0 до 25%. В 4-й зоне погрешность составляет от 125 до 150 % СКП единицы веса. В 5-й зоне погрешность положения пункта превышает более чем на 50% СКП единицы веса. Первая картограмма наглядно показывает, что благоприятные зоны распределения погрешностей находятся также и в непосредственной близости от створа. Это особенно важно при маркшейдерском обеспечении строительства подземных выработок. В силу форм и размеров подземных сооружений станция ОЛУЗ всегда находится в непосредственной близости от створа исходных пунктов.

На второй картограмме (см. рис. 4, б) 1-я зона отсутствует, 2-я зона погрешностей минимальна и представлена окружностью. В 3-й зоне погрешности превышают СКП единицы веса на величину от 0 до 25%, в 4-й зоне погрешность составляет от 25 до 50% СКП единицы веса, в 5-й зоне погрешность положения пункта превышает более чем на 50 % СКП единицы веса.

На третьей картограмме (см. рис. 4, в) мы видим пять зон погрешностей с ярко выраженной асимметрией. Подобная асимметрия объясняется тем, что через теорему косинусов острые углы вычисляются точнее, чем тупые.

На четвертой картограмме (см. рис. 4, г) также имеется асимметрия, причины которой описаны выше. На пятой картограмме (см. рис. 4, д) также имеется асимметрия, вызванная тем, что по теореме синусов тупые углы вычисляются точнее, чем острые. Сведем все полученные данные по всем картограммам в таблицу.

Как видно из сравнения картограмм, наиболее благоприятным вариантом вычисления углов β и γ с точки зрения определения точности положения пункта по схеме ОЛУЗ является их вычисление по теореме синусов, т.е. вычисление обратных весов углов при исходных пунктах по формуле (15). (см. рис. 4, а). С помощью этой картограммы определим оптимальную конфигурацию взаимного положения трех исходных пунктов и определяемого пункта путем совмещения двух картограмм №1 — для базисов 1–2 и 2–3 (рис. 5).

Из рис. 5 следует, что месторасположение исходных пунктов в схеме ОЛУЗ не оказывает существенного влияния на точность, однако схема, при которой определяемый пункт находится внутри исходных, является более предпочтительной. Наименьшие значения погрешностей имеют место в случае, когда пункта А удален от исходных не более чем на расстояние базиса. Этот вывод находит подтверждение в работах [8,9].

Установим далее зависимость величины погрешности определяемого пункта А от числа исходных, изменяя их в пределах от $2 \leq n \leq 10$. Вычисления выполним для наиболее благоприятной конфигурации ОЛУЗ — при нахождении определяемого пункта в 1-й зоне (см. рис. 4, а) по формулам (2), (3), (15). По по-

Сводная таблица характеристик картограмм погрешностей

№ п/п	Погрешность положения пункта M_p , мм	СКП ед. веса ($\mu=ms=2\text{мм}$), %	Номера картограмм	Число зон	Формулы для вычисления обратного веса углов	
					β	γ
1	Менее 1,7	Менее 85	1	1–5	(15)	(15)
2	1,7 – 2,0	85 – 100	2	2–5	(16)	(16)
3	2,0 – 2,5	100 – 125	3	1–5	(15)	(16)
4	2,5 – 3,0	125 – 150	4	1–5	(16)	(17)
5	Свыше 3,0	Более 150	5	1–5	(15)	(17)

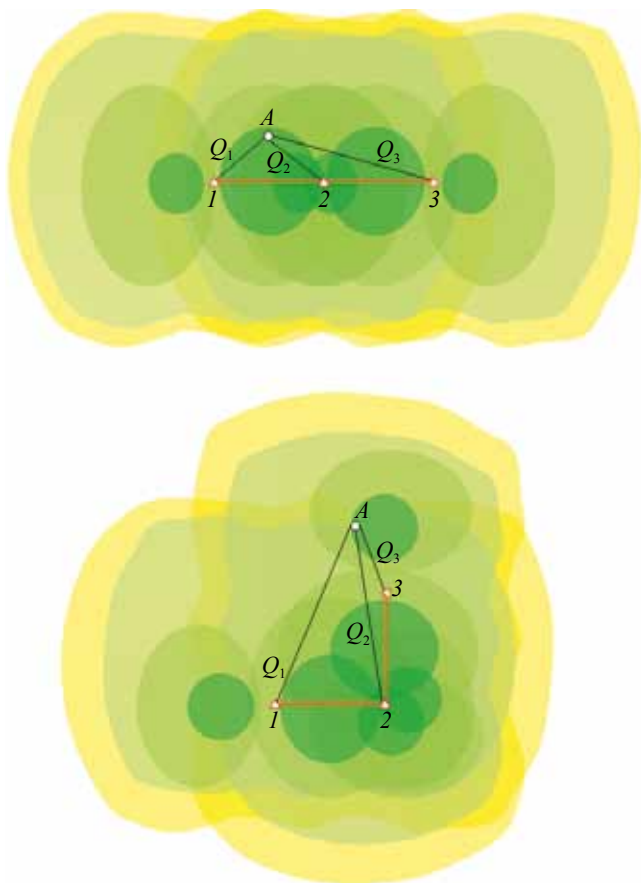


Рис. 5. К определению оптимальной конфигурации исходных и определяемого пунктов

лученным численным данным (M и n) построим график (рис. 6).

С помощью программного обеспечения MS Excel была подобрана оптимальная функция связи этих параметров (степенная функция) и определены ее параметры

$$m_A = 2n^{-0,499} = \frac{\mu}{\sqrt{n}},$$

где n — число исходных пунктов.

Эта формула позволяет исполнителю обоснованно выбирать схему построения ОЛУЗ при заданной точности положения определяемой точки.

По результатам приведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При использовании ОЛУЗ имеются две зоны распределения погрешностей определяемого пункта, не превышающие СКП единицы веса (см. рис. 4, а).

2. Целесообразно придерживаться разноплечия измеряемых сторон.

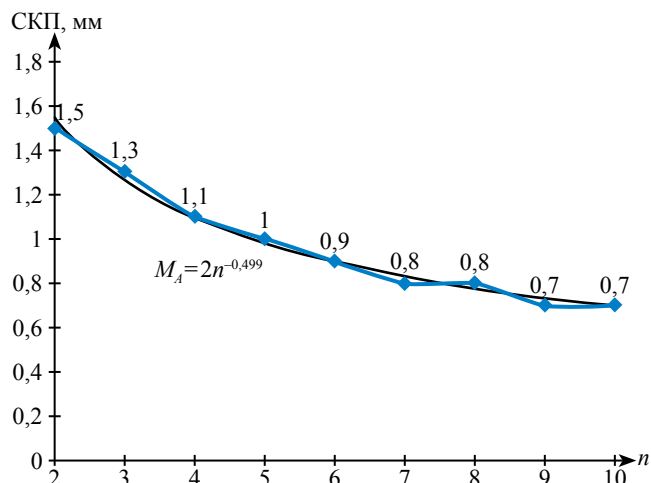


Рис. 6. График погрешности планового положения определяемого пункта:

— кривая аппроксимации; — эмпирическая кривая

3. Наилучшей является та конфигурация исходных пунктов, при которой определяемый пункт будет находиться внутри фигуры, образованной исходными.

4. Точность ОЛУЗ обратно пропорциональна корню квадратному из числа исходных пунктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяинов И.В. Обратная линейно-угловая засечка. Новый взгляд на геометрию засечки // Геомаркетинг. Инженерные изыскания. – 2015. – № 7. – С. 62–66.
2. Ключин Е.Б., Михелев Д.Ш., Зайцев А.К., Барков Д.П. Практикум по прикладной геодезии. — М.: Недра, 1993. — 368 с.
3. Симонян В.В., Шмелин Н.А., Зайцев А.К. Геодезический мониторинг зданий и сооружений. — М.: НИУ МГСУ, 2015. — 144 с.
4. Зайцев А.К. Трилатерация. — М.: Недра, 1986. — 216 с.
5. А-GEO магазин геодезического оборудования [Электронный ресурс] Содержит описание технических характеристик геодезического оборудования режим доступа <http://www.a-geo.com/obshchie/takheometry-leica> (дата обращения 12.01. 2016)
6. А-GEO магазин геодезического оборудования [Электронный ресурс] Содержит описание технических характеристик геодезического оборудования режим доступа <http://www.a-geo.com/obshchie/takheometry-sokkia> (дата обращения 12.01. 2016)
7. Никонов А.В. К вопросу определения постоянной поправки дальномера электронного тахеометра // Вестник СГУГиТ. – 2015. – №1. – С. 54–61.
8. Пособие по практической работе [Электронный ресурс] режим доступа http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document406433/SC_Design%20of%20backsight%20point%20configuration%20in%20resection%20setup.htm (дата обращения 25.03. 2016)
9. Пособие по практической работе [Электронный ресурс] режим доступа <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-406441/TechTip%20-%20Survey%20Controller%20Software%20-%20Weights%20in%20Resection%20-English.htm> (дата обращения 25.03. 2016)

Принята к печати 31 мая 2016 г.
Рекомендована кафедрой
прикладной геодезии МИИГАиК

МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ДЕТАЛЬНОСТИ ТРАЕКТОРИИ И ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДИНАМИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГНСС

©2016 А.Л. Фялковский

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

a.fialkovskii@mail.ru

Аннотация. Описана методика обработки данных при мониторинге динамических сооружений с использованием ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем), в основе которой лежит метод наложения интервалов. Дано математическое описание методики. На основе выполненных полевых наблюдений, с использованием спутниковых приёмников Leica GX 1230 и специальной экспериментальной установки, на практике проверена работоспособность предлагаемой методики. Экспериментальная проверка показала, что обработка полевых измерений с использованием предложенной методики имеет преимущества перед традиционными методами обработки, а именно повышение детальности выявляемой траектории смещений исследуемого объекта; увеличение точности определения координат исследуемого объекта на конкретный момент времени. Отличительной характеристикой представленной методики является то, что повышение точности вычисления координат осуществляется без ущерба детальности выявления смещений объекта.

Ключевые слова: спутниковые технологии, мониторинг с использованием ГНСС, обработка спутниковых измерений, динамические сооружения, экспериментальная установка

METHOD OF IMPROVE DETAIL OF THE TRAJECTORY AND INCREASE ACCURACY OF THE COORDINATES CALCULATION OF DYNAMIC CONSTRUCTIONS FOR MONITORING BY GNSS

©2016 Fialkovskiy A.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

a.fialkovskii@mail.ru

Abstract. This article describes a method of data processing for monitoring the dynamic structures using GNSS (global navigation satellite systems). The basis of the technique proposed is intervals overlay method, described by the author in previous works. The mathematical description of the method is represented by formulae and as a block diagram.

Based on field observations, made in practice, functionality of methodology proposed has been checked. Field observations have been made using satellite receivers Leica GX 1230, and special experimental equipment. Experimental verification has shown that the processing of field measurements, using the technique proposed has advantages over traditional methods of treatment. The main advantages are: increase the detail of detectable displacement trajectory of an object; increase the accuracy of determining the coordinates of researched construction at a particular time. Increasing the accuracy of the coordinates does not cause reduction of detail detectable displacement trajectory.

Keywords: satellite technology, monitoring using GNSS, satellite data processing, dynamic structures, the experimental equipment

Динамическое сооружение — это здание или иное сооружение, подверженное смещениям или колебаниям под воздействием внешних или внутренних деформирующих факторов. Внешними деформирующими факторами являются солнечный нагрев конструкции, ветровая нагрузка, снеговая нагрузка и т.д.; внутренними — перемещение оборудования внутри этих сооружений, перемещения самого сооружения (пример — антенные комплексы) и т.д. Широко распространены такие динамические

объекты, как мосты, плотины, сооружения башенного и мачтового типов.

В ряде случаев на динамических объектах могут быть закреплены антенны постоянно действующих базовых станций (ПДБС). Это может быть сделано, во-первых, для геотехнического мониторинга самих инженерных сооружений: плотины ГЭС, опоры канатных дорог и другие опасные объекты требуют постоянного наблюдения. Во-вторых, при создании спутниковой геодезической сети на террито-

риях с плотной застройкой или на заповедных территориях (где запрещена рубка деревьев) отсутствует возможность установки антенн на уровне земной поверхности. Примером служит г. Москва, где из-за плотной застройки существующая система навигационно-геодезического обеспечения (СНГО Москвы) состоит из ПДБС, закреплённых на крышах зданий, в том числе и на сооружениях башенного типа [1]. Другой пример: мониторинг оползневого склона природного заказника «Воробьёвы горы», территория которого преимущественно покрыта лесом, ведётся с использованием ГНСС-оборудования, закреплённого на опорах канатной дороги. И в случае мониторинга зданий и сооружений, и в случае вынужденного закрепления ПДБС на динамических объектах необходимо определять координаты антенн с максимально высокой точностью. Во избежание потери информации о смещениях антенны необходимо применять особые методы обработки данных.

Динамика сооружения, на котором установлена станция, подразумевает изменение координат антенны в течение суток (или в течение иного промежутка времени, в зависимости от действия деформирующих факторов). Обработка измерительной информации, получаемой с приёмников, ведётся обычно в режиме «статика», т.к. точность определения координат при этом выше, чем в режиме «кинематика». Обеспечение высокой точности определения координат подразумевает деление каждого суточного ряда данных на интервалы, результатом обработки которых является траектория движения антенны в течение суток. При этом интервалы располагаются один за другим (рис. 1). По результатам обработки всех интервалов получают ряд координат, по времени разнесённых на длину выбранного интервала. Изменение значений координат со временем характеризует смещения исследуемого объекта [2].

Обработка данных мониторинга описаным выше способом широко распространена в мировой практике. В статье [3] описана задача выявления колебаний Штутгартской телебашни, вызванных неравномерным солнечным нагревом сооружения. Для этой цели временной ряд (необработанная информация, собранная

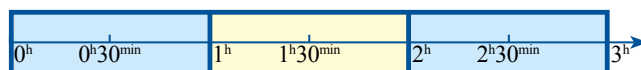


Рис. 1. Пример обработки с использованием интервалов по 1 ч

спутниковыми приёмниками) был разделён на интервалы по 10 мин и каждый интервал был обработан в режиме «статика». В результате получен график, описывающий суточный ход верхней части башни. Смещения в горизонтальной плоскости в исследуемый период достигают 18 см и носят эллиптический характер. Сделан вывод, что главной причиной зафиксированных сдвигов является неравномерный солнечный нагрев телебашни.

В работах [4–6] описана задача наблюдения за деформациями 108-метровой металлической фермы, выявленные суточные смещения составляют порядка 4–5 см. В этом случае применялась обработка временного ряда интервалами по 10 мин. Такой же интервал обработки был использован для выявления деформаций 30-метрового здания, не являющегося сооружением башенного типа, результаты мониторинга которого описаны в статье [7]. В работе [8] для мониторинга деформационных процессов на Загорской ГАЭС были использованы интервалы по 1 ч. В статье [9] описаны результаты мониторинга Шуховской радиобашни на Шаболовке, где для получения графиков смещения конструкции суточные ряды измерений разделены на интервалы по одному часу. Выявленные в результате суточные смещения верхней части башни вызваны неравномерным солнечным нагревом сооружения, достигают 6 см и носят эллиптический характер.

Примеры подобной обработки спутниковых измерений можно встретить и в других статьях [10–12]. Однако описанный метод обработки данных в режиме «статика» имеет недостаток — сильное сглаживание и низкая детализация выявляемых смещений. Величина сглаживания зависит от используемой длины интервала обработки: увеличение интервала ведёт к усилению сглаживания выявляемой траектории и, следовательно, к понижению точности определения координат антенны на какой-либо конкретный момент времени. Уменьшение интервала повышает детализацию, но может привести к падению точности определения координат.

Для устранения указанного недостатка предлагается вычислять координаты антенны с использованием метода наложения интервалов (МНИ), т. е. путём обработки интервалов, которые идут не один за другим, а частично накладываются друг на друга (рис. 2) [2, 13]. Обработка данных с использованием метода наложения интервалов представляет собой скользящую по временному ряду прямоугольную оконную функцию, в границах которой выполняется обработка данных в режиме «статика». Такой метод позволяет получать координаты станции, закреплённой на динамическом сооружении, практически с любой частотой. При этом сохраняется величина интервала обработки, необходимая для уверенного разрешения неоднозначности и для обеспечения достаточной точности вычисления координат.

На основе метода наложения интервалов разработана методика обработки данных мониторинга динамических объектов, проводимого с использованием ГНСС. Для описания методики будут использоваться следующие обозначения:

t — временной ряд, состоящий из необработанных данных с приёмников;

T — длительность интервала обработки;

a_i — точка, получаемая по результатам обработки интервала, характеризуется координатами N_i, E_i, H_i в топоцентрической системе координат, центром которой является базовая станция. Координаты точки a_i по времени относятся к центру интервала T ;

$a_i(T)$ — обозначение того, что точка a_i получена по результатам обработки интервала T ;

Δt — сдвиг одного интервала относительно другого;

τ — отрезок времени, на который при необходимости увеличивается интервал обработки T ;

$n=0, 1, 2, 3, \dots$ — коэффициент увеличения τ ;

m_{Ni}, m_{Ei}, m_{Hi} — характеристика точности определения координат каждой конкретной точки a_i по каждой из осей.

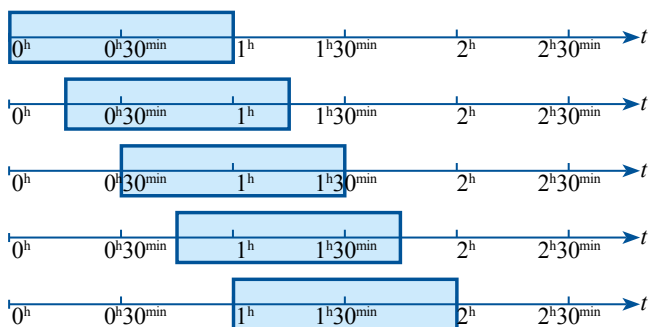


Рис. 2. Пример обработки с использованием интервалов по 1 ч с наложением 45 мин

Методика обработки данных ГНСС-наблюдений на основе метода наложения интервалов.

1. Результатом обработки интервала T , выделенного из временного ряда t , являются координаты точки a_i , по времени отнесённые к центру интервала T (рис. 3):

$$a_i(T + n\tau) = \begin{bmatrix} N_i \pm m_{Ni} \\ E_i \pm m_{Ei} \\ H_i \pm m_{Hi} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где изначально $n=0$.

2. В зависимости от точности измерительной аппаратуры и условий наблюдений устанавливаются предельные погрешности в плане $m_{NE\text{доп}}$ и по высоте $m_{H\text{доп}}$. Значения предельной погрешности могут быть заданы как двойная или тройная точность измерительных приборов. Значение плановой предельной погрешности определяется по формуле

$$m_{NE} = \sqrt{m_{Ni}^2 + m_{Ei}^2}. \quad (2)$$

На основе предельных погрешностей формируется неравенство

$$\begin{cases} m_{NEi} \leq m_{NE\text{доп}}, \\ m_{Hi} \leq m_{H\text{доп}}. \end{cases} \quad (3)$$

3. В случае, если неравенство (3) выполняется, интервал сдвигается по временному ряду

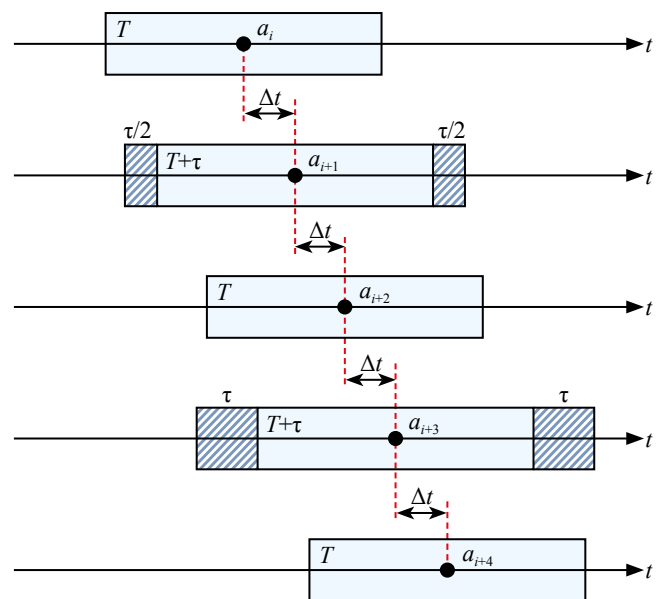


Рис. 3. Схема обработки данных скользящим интервалом, в границах которого выполняется обработка в режиме «статика»

на величину Δt , после чего повторяется обработка в режиме «статика» интервалом T :

$$a_{i+1}(T + n\tau) = \begin{bmatrix} N_{i+1} \pm m_{N_{i+1}} \\ E_{i+1} \pm m_{E_{i+1}} \\ H_{i+1} \pm m_{H_{i+1}} \end{bmatrix},$$

при $n=0$. Полученные значения погрешностей $m_{N_{i+1}}$, $m_{E_{i+1}}$, $m_{H_{i+1}}$ сравниваются с предельными погрешностями и цикл повторяется.

4. Если неравенство (3) не выполняется т.е. $m_{NEi} \geq m_{NE\text{доп}}$ или $m_{Hi} \geq m_{H\text{доп}}$, то для нахождения координат рассматриваемой точки a_i интервал обработки следует увеличить на величину τ :

$$a_i(T + n\tau) = \begin{bmatrix} N_i \pm m_{N_i} \\ E_i \pm m_{E_i} \\ H_i \pm m_{H_i} \end{bmatrix},$$

где $n=1, 2, 3 \dots$

Увеличение длительности интервала обработки происходит путём добавления равных временных отрезков $\tau/2$ к началу и к концу интервала T так, чтобы центральная точка интервала не изменила своего положения во временном диапазоне (см. рис. 3). После увеличения интервала на величину τ вновь вычисленные значения m_{N_i} , m_{E_i} и m_{H_i} повторно сравниваются с допустимыми. Если интервала $(T+\tau)$ недостаточно для достижения необходимого уровня точности, значение n последовательно увеличивается до тех пор, пока погрешности m_{N_i} , m_{E_i} и m_{H_i} не будут в допустимых пределах.

5. Вычисление координат каждой следующей точки a_{i+k} начинается с обработки интервала первоначальной длины T .

Методику обработки данных ГНСС-наблюдений на основе метода наложения интервалов можно представить в виде схемы (рис. 4).

Выбор начальной длины интервала T можно осуществить либо на основе предварительной обработки собранной измерительной информации, либо на основе экспериментальных наблюдений.

Одним из ограничений при выборе длины интервала является динамика сооружения, на котором закреплена ПДБС. Величины смещений могут составлять от миллиметров (плотины, здания малой этажности) до метров (телебашни, небоскрёбы). Соответственно, скорости смещений v измеряются от мм/ч до дм/ч. При высоких скоростях смещений антенны обработка с использованием больших интервалов либо не позволяет разрешить неоднозначность и даёт некорректный результат, либо приводит к сильному сглаживанию траектории движения антенны. Скорость смещения различных элементов сооружения теоретически может быть рассчитана, если известны все параметры конструкции. Приближённые значения смещений могут быть получены по типовым моделям, характерным для тех или иных видов сооружений [14]. Однако такие результаты могут оказаться далеки от реальных, что связано с конструктивными особенностями со-

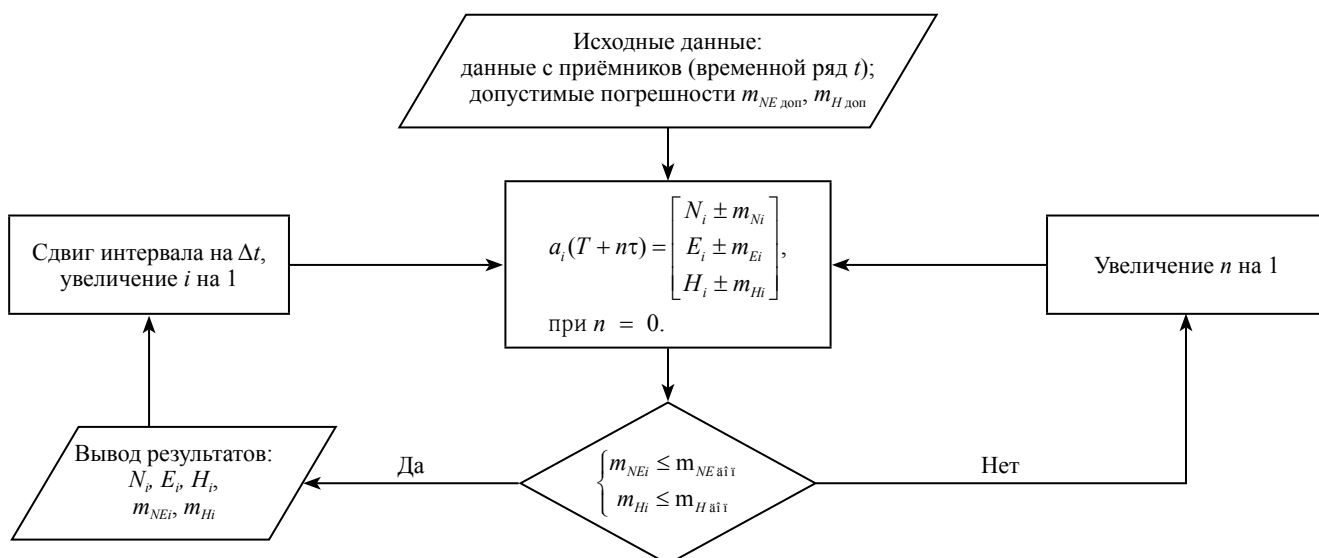


Рис. 4. Схема предлагаемой методики обработки данных при мониторинге динамических сооружений с использованием ГНСС

оружения, условиями строительства и эксплуатации [15].

В ходе экспериментальных исследований, проведённых автором статьи, установлена зависимость предельной величины интервала T от скорости смещения антенны ПДБС. Наблюдения выполнялись с использованием спутниковых приёмников Leica GX 1230. Результатом исследования является график, отражающий предельную величину интервала обработки в зависимости от скорости смещения сооружения (рис. 5). Если для какой-либо скорости использовать интервал T больший, чем значения на графике, вероятно получение некорректного решения.

Интервалом малой величины (1–5 мин) можно обрабатывать измерения даже при высоких скоростях смещений, вплоть до метров в час. Однако такие результаты чрезвычайно требовательны к качеству исходной информации и малейшее её ухудшение (уменьшение числа спутников, ухудшение геометрического фактора DOP, любые переотражённые сигналы) приводит к появлению грубых ошибок. По этой причине некоторые исследователи не рекомендуют использовать интервалы менее 10 мин [7].

Экспериментальная проверка предложенной методики. Представленные в статье теоретические выкладки подтверждены результатами экспериментальных наблюдений. Для проверки описанной методики использована созданная автором экспериментальная установка, обеспечивающая перемещение антенны приёмника по заданной круговой траектории (рис. 6). В ходе исследования сравнивается траектория движения, определённая из спутниковых наблюдений, и реальная траектория, пройденная антенной [2, 9, 16, 17].

В ходе исследования выполнены полевые наблюдения с использованием экспери-

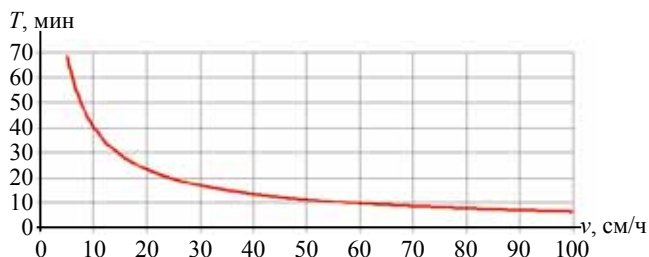


Рис. 5. Зависимость предельной величины интервала обработки от скорости смещения сооружения

ментальной установки. В работе применялись спутниковые приёмники Leica GX 1230. Полученный по результатам наблюдений ряд данных обработан в режиме «статика» интервалом $T=10$ мин без использования наложения интервалов (см. рис. 1). Результаты обработки представлены на рис. 7.

Плановая невязка f вычисляется на основании значений, показанных на рис. 7, а, б. Допустимое значение невязки устанавливается в соответствии с пунктом 2 методики. Точность определения координат в режиме «статика» в плане для спутниковых приёмников Leica GX 1230 составляет 5 мм+1 мм/км. Допустимое значение погрешности, установленное в данной работе, составляет 10 мм.

На рис. 7 показаны результаты обработки без использования предложенной методики, интервалы следуют один за другим, аналогично рис. 1. На рис. 7, в видно, что при обработке интервалом $T=10$ мин отклонение одной из точек от реальной траектории антенны превышает допустимое значение.

К этому же ряду данных применена методика обработки результатов мониторинга динамических объектов, основанная на методе наложения интервалов (пункт 1 методики). Результаты обработки с использованием интервала $T=10$ мин и наложения интервалов 8 мин показаны на рис. 8.

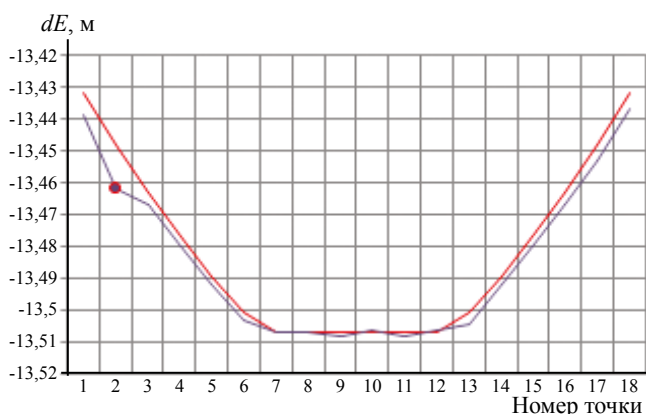
На рис. 8, в сравнении с рис. 7, добавляется большое количество промежуточных точек, которые позволяют детальнее описать траекторию смещений антенны (количество точек увеличивается почти в 5 раз). Как видно на рис. 8, в, вычисленные координаты точек б и 7



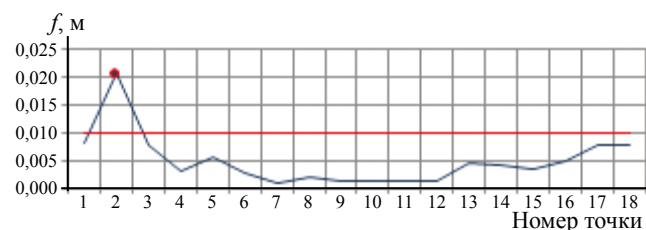
Рис. 6. Экспериментальная установка для исследования представленной методики



a



б



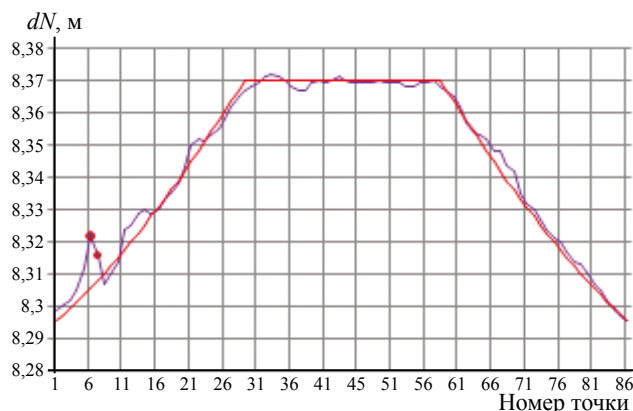
в

Рис. 7. Выявленное из измерений (фиолетовая линия) и реальное (красная линия) движение антенны при обработке интервалом $T = 10$ мин, без наложения интервалов:

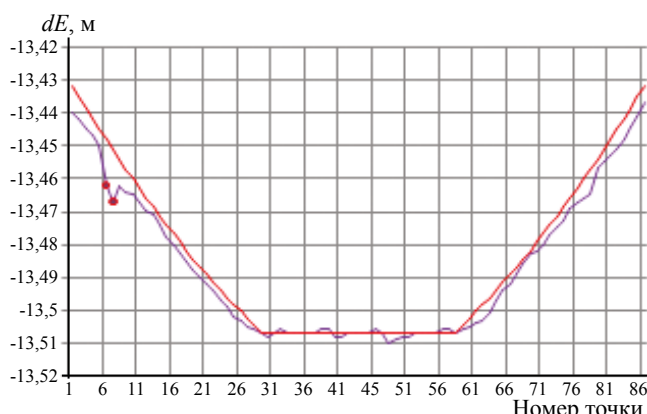
a — в направлении dN ; *б* — в направлении dE ; *в* — плановая невязка f (синяя линия) и предельная погрешность $f_{\text{доп}} = 1$ см (красная линия)

содержат грубые ошибки: плановая невязка f составляет 21 и 18 мм соответственно, что превышает допустимое значение. Грубые ошибки, которые присутствуют на графиках на рис. 7, попадают и на графики на рис. 8.

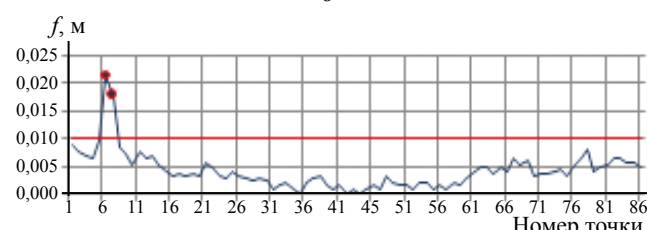
Грубая ошибка в точке 2 на рис. 7 (соответствует точке 6 на рис. 8) приводит к тому, что в этом временном диапазоне точно известны только координаты точек 1 и 3, которые разнесены по времени на 20 мин. На рис. 8 грубые ошибки содержат координаты точек 6 и 7, а значит точ-



a



б



в

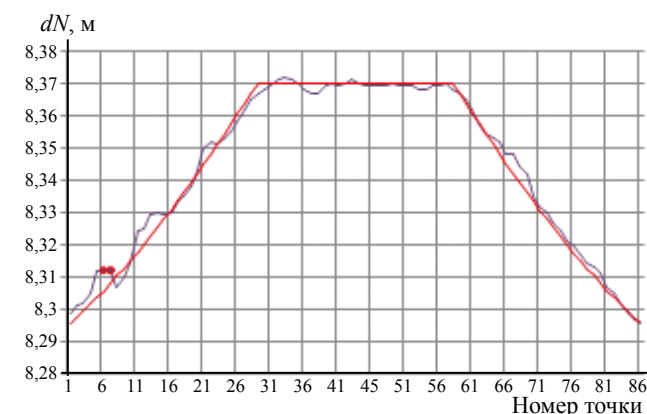
Рис. 8. Выявленное из измерений (фиолетовая линия) и реальное (красная линия) движение антенны при обработке интервалом $T = 10$ мин, наложение интервалов 8 мин:

a — в направлении dN ; *б* — в направлении dE ; *в* — плановая невязка f (синяя линия) и предельная погрешность $f_{\text{доп}} = 1$ см (красная линия)

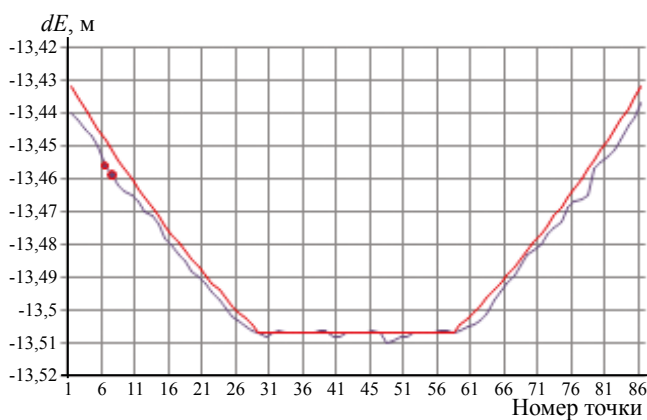
но известны координаты точек 5 и 8, которые разнесены по времени на 6 мин. Применение методики, основанной на методе наложения интервалов, позволяет повысить точность и детальность определения траектории смещений антенны, закреплённой на динамическом объекте. Особенно эти преимущества заметны при работе в сложных условиях (при наличии многопутности, малом числе спутников и т. д.), когда необходимо использовать большие интервалы обработки, по 30 мин и более.

Устранение грубых ошибок в определении координат при использовании методики обработки данных на основе МНИ происходит путём повторного вычисления координат точек 6 и 7 увеличенным интервалом ($T+\tau$)=12 мин (в соответствии с пунктом 4 методики). На рис. 9 показаны результаты повторного вычисления координат точек 6 и 7.

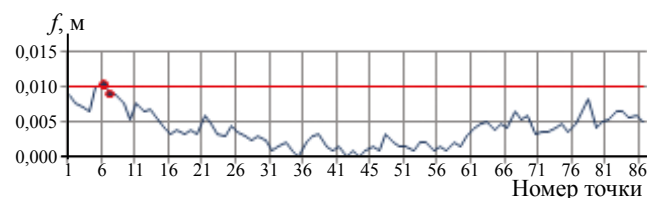
Как показано на рис. 9, а, б, после повторного вычисления координат точек 6 и 7 увеличенным интервалом грубые ошибки в направлениях dN и dE уменьшились. На рис. 9, в



а



б



в

Рис. 9. Выявленное из измерений (фиолетовая линия) и реальное (красная линия) движение антенны при обработке интервалом $T = 10$ мин, наложение интервалов 8 мин (повторные вычисления):

а — в направлении dN ; б — в направлении dE ; в — плановая невязка f (синяя линия) и предельная погрешность $f_{\text{доп}} = 1$ см (красная линия)

видно, что после обработки временного ряда с использованием методики обработки данных, основанной на МНИ, все плановые невязки находятся в допустимых пределах.

В процессе использования описанной в статье методики для обработки результатов измерений при решении производственных задач отсутствует возможность сравнения полученных смещений с истинным движением антенны. В качестве критерия точности в этом случае целесообразно использовать значения точности измерений в плане и по высоте (Horizontal precision и Vertical precision), которые вместе с координатами для каждой точки вычисляются в специализированном программном обеспечении.

Выводы.

1. Использование методики обработки данных мониторинга динамических сооружений, основанной на методе наложения интервалов, позволяет повысить детальность и точность выявления смещений антенны.

2. В статье представлено математическое описание методики обработки данных мониторинга динамических сооружений с использованием ГНСС.

3. При наличии грубых ошибок представленная методика позволяет повторно вычислять координаты увеличенным интервалом конкретно для точек, содержащих эти ошибки, не увеличивая при этом интервал обработки для всего остального ряда.

4. Работоспособность методики проверена в ходе полевых исследований с использованием специальной экспериментальной установки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00391 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНГО Москвы [электронный ресурс]. URL: <http://sngo.mggt.ru> (дата обращения 05.07.2015).
2. Фялковский А.Л. Особенности обработки результатов спутниковых наблюдений за сооружениями, имеющими суточный ход / Материалы X научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.: –2014. С. 125–130.
3. Breuer P. The Stuttgart TV Tower - displacement of the top caused by the effects of sun and wind // Breuer P., Chmielewski T., Gorski et al. Engineering Structures 30 (2008). P. 2771–2781.
4. Li X.J. Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system // Li X. J., Ge L. L., Ambikairajah E. et. al. GPS Solutions. 2006. V. 10, № 4. P. 233–247.
5. Tamura Y. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS and integrity monitoring / Tamura Y., Yoshida A.,

Ishibashi R. et al. Proc. 2nd Int. Symposium on Advances in Wind & Structures. 2002. P. 599-606.

6. Yoshida A. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS and integrity monitoring // Yoshida A., Tamura Y., Matsui M. et al. J Struct. Constr. Eng. 2003. T. 571. P. 39-44.

7. Seco A. Assessing building displacement with GPS // Seco A., Tirapu F., Ramirez F. et al. Building and environment. 2007. T. 42. № 1. P. 393-399.

8. Генике А.А., Черненко В.Н. Исследование деформационных процессов Загорской ГАЭС спутниковыми методами // Геодезия и картография. – 2003. – № 2. – С. 27–33.

9. Лапшин А.Ю., Староверов С.В., Фялковский А.Л. Исследование суточного движения Шуховской башни спутниковыми методами / Сб. материалов IX общероссийской конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – 2013. – С. 127–130.

10. Свердлик С.Н., Цуцков С.Н. О возможности мониторинга смещений высотных объектов с помощью одночастотной спутниковой аппаратуры ГЛОНАСС/GPS // Геопрофи. – 2007. – №1. – С. 59–61.

11. Скрипников В.А., Скрипникова М.А. К вопросу модернизации плановой сети для определения деформаций плотин ГЭС // Геодезия и картография. – 2012. – №1. – С. 4–7.

12. Yi T.H., Li H.N., Gu M. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures //

Structural control and health monitoring. V. 20, I. 5, May 2013, P.: 649–670.

13. Фялковский А.Л. Создание современных комбинированных сетей для оценки деформационной опасности городских агломераций и промышленных площадок // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». – 2013. – №6. – С. 16–19.

14. Бикташев М.Д. Башенные сооружения. Геодезический анализ осадки, крена и общей устойчивости положения. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 376 с.

15. Герасимов В.А., Лобазов В.Я., Резник Б.Е. и др. Применение метода конечных элементов при анализе высокочастотных измерений на железнодорожных мостах // Геопрофи. – 2011. – № 3. – С. 65–69.

16. Фялковский А.Л. Полевая экспериментальная установка для исследования реальной точности получения координат с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / Сб. докладов VI международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи — путь к обществу, основанному на знаниях». М.: 2014. – С. 120–122.

17. Фялковский А.Л. Деформационный мониторинг высотных сооружений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 5. – С. 54–59.

Принята к печати 9 июня 2016 г.

Рекомендована кафедрой геодезии МИИГАиК

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС

©2016 Ю.И. Пимшин¹, Е.Б. Ключин², В.Н. Медведев³, О.А. Губеладзе⁴, В.А. Наугольнов¹, Ю.В. Заяров¹, Ю.С. Забазнов¹

¹Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета, Россия

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

³Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

⁴Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
yipimshin@mephi.ru, eklyushin37@mail.ru, cont@ibrae.ac.ru, buba26021966@yandex.ru

Аннотация. Описана теоретическая основа для построения мобильной геодезической диагностической системы, предназначенной для определения и оценки технического состояния защитных герметичных оболочек атомных электрических станций в период приёма-сдачи и эксплуатации.

Ключевые слова: защитная герметичная оболочка, техническое состояние, преднапряжение, испытание, контроль, оценка технического состояния

ON CHECKING A TECHNICAL CONDITION OF PROTECTIVE LEAK-TIGHT CONTAINMENT OF NUCLEAR POWER PLANTS

©2016 Pimshin Yu.¹, Klushin E.², Medvedev V.³, Gubeladze O.⁴, Naugol'nov V.¹, Zayarov Yu.¹, Zabaznov Yu.¹

¹Volgodonsk Engineering Technical Institute – Volgodonsk branch of National Research Nuclear University, Russia

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

³The Nuclear Safety Institute, Moscow, Russia

⁴Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

yipimshin@mephi.ru, eklyushin37@mail.ru, cont@ibrae.ac.ru, buba26021966@yandex.ru

Abstract. The paper describes theoretical basis for construction of portable geodesic diagnostic system designed to identify and evaluate the technical condition of protective containments of nuclear power plants in the period of handover and operation.

Keywords: protective hermetic shell, technical condition, prestressing, testing, monitoring, assessment of technical condition

В современных условиях развития государства предполагается опережающее развитие энергогенерирующих предприятий. При этом особая роль отводится строительству атомных электрических станций (АЭС), которые характеризуются малым влиянием на экологию (таблица) и большой мощностью. Однако развитие атомной энергетики как ни какая другая энергетическая отрасль связана с проблемой безопасной эксплуатации ее объектов. Данная проблема имеет как психологическую, так и физическую составляющие.

Психологическая составляющая базируется на позитивном и негативном опыте эксплуатации объектов атомной энергетики. Здесь необходимо осуществлять просветительскую деятельность, а в информационном смысле, необходима открытость и достоверность интерпретации событий, связанных с АЭС.

Физическая составляющая связана с:

качественным проектированием, основанном на последних достижениях науки и техники;

эффективным строительством, реализующим современные инновационные технологии возведения сложных объектов;

ответственной эксплуатацией, основанной на многофакторном объективном анализе состояния элементов эксплуатируемых объектов и оценки их остаточного ресурса.

В настоящее время зарекомендовавшими как наиболее надежными и безопасными, успешно эксплуатируемыми в России и за ее рубежом — АЭС с реактором ВВЭР-1000 или его модификациями. Их всестороннее исследование и совершенствование является необходимым условием дальнейшего повышения уровня безопасности и эффективности работы данных объектов.

Особое место во всестороннем изучении элементов АЭС занимают исследования контуров защиты, одним из которых является защитная герметичная оболочка (ЗГО). Защитная герметичная оболочка характеризуется сложным строительным решением и является элементом, обеспечивающим защиту окружающей среды от негативного расчетного события гипотетически возможного в гермообъеме, с одной стороны, и обеспечение защиты работающего реактора от внешних воздействий, с другой стороны.

Жизненные циклы ЗГО связаны с её проектированием, возведением, сдачей-приемкой, эксплуатацией и утилизацией. Все без исключения жизненные этапы ЗГО являются важными и требуют ответственного отношения к реализации соответствующего комплекса работ. Однако период сдачи-приемки занимает особенное место, так как на этом этапе осуществляют преднапряжения и испытание ЗГО, по результатам которых формируется заключение о возможности последующей ее эксплуатации. Процессы преднапряжения, испытания и дальнейшая эксплуатация ЗГО связаны с контролем ее физико-механических и геометрических параметров, на основе обработки данной измерительной информации делаются заключения о техническом состоянии и ее ресурсных характеристиках.

Используемая штатная встроенная система контроля, состоящая из струнных преобразователей (рис. 1), предназначенная для контроля напряженно-деформированного состояния ЗГО, зарекомендовала себя как ненадежная на продолжительный срок эксплуатации. Основными недостатками встроенной системы является то, что струнные преобразователи имеют ограниченный срок эксплуатации (15–20 лет) и в период эксплуатации невозможно провести их ремонт и достоверную та-

Сравнительные показатели экологического воздействия ТЭС и АЭС мощностью 1000 МВт

Показатели	ТЭС			АЭС Природный уран
	на угле	на мазуте	на газе	
Потребление топлива, тыс.т/год	5 900	2 200	2 600 000	0,2
Потребление атмосферного кислорода	5 500 000	3 400 000	4 400 000	
Газовые выбросы, тыс.т/год:				
углекислый газ	10000	6000	2000	
оксиды серы	124,4	84	—	
оксиды азота	34,2	21,9	23,6	
Твёрдые отходы тыс.т/год	830	—	—	0,03
Индивидуальная доза облучения вблизи станции мзв / год	0,005			0,002

рировку. Нормативный срок эксплуатации защитных оболочек АЭС с реактором ВВЭР-1000 проекта НП-1000 — 30 лет и проекта АЭС-2006 — 50 лет. Кроме этого, как правило, срок продления эксплуатации объекта порядка 30 лет. С учетом сроков вывода энергоблока из эксплуатации и наблюдения после вывода из эксплуатации жизненный цикл АЭС составляет более 100 лет. В то же время на сегодняшний день отсутствует научно обоснованная методика построения эффективной, дублирующей штатную, контрольно-измерительной системы, предназначенной для определения деформационных характеристик ЗГО, на основе которых выполнялась бы оценка ее технических характеристик и параметры остаточного ресурса по условию прочностных параметров на всех жизненных этапах оболочки. В настоящей статье на основе результатов многолетних работ, выполненных на площадках строящихся Ростовской и Ленинградской АЭС, коллективом авторов предлагается теоретическая основа такой контрольно-измерительной системы.

Одним из основных критериев оценки технического состояния ЗГО, ее надежности, исходя из требований СП-52-102-2004, является коэффициент запаса прочности,

$$K = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

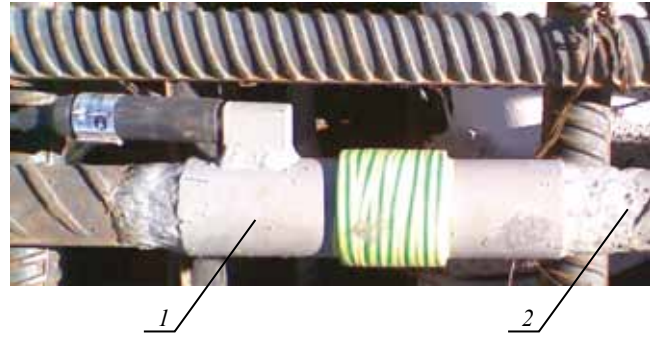
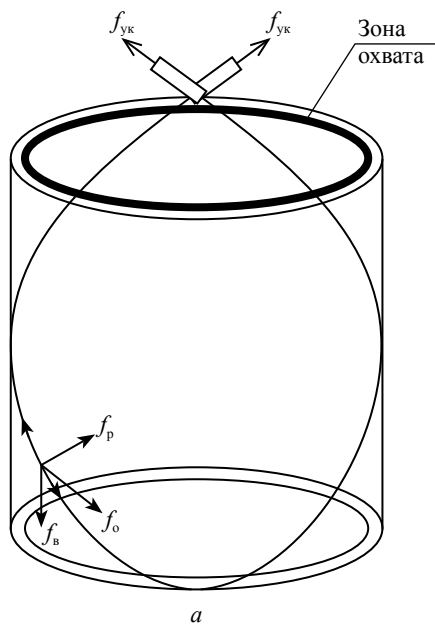


Рис. 1. Струнный датчик штатной встроенной системы, вваренный в арматурный каркас:

1 — струнный датчик; 2 — стержневая арматура

где $\sigma_{\text{пред}}$ — предельное напряжение; $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение.

Рассмотрим возможность определения коэффициента запаса прочности на примере цилиндрической части ЗГО. Данный вариант упрощает подход к рассмотрению темы, но является допустимым в силу того что в зоне сопряжения купольной и цилиндрической частей оболочки проекта НП-1000 строится опорное кольцо, которое фактически обеспечивает раздельную работу этих частей оболочки. При этом усилие от натяжения каждого каната раскладывается на меридиональную, окружную и радиальную составляющие (рис. 2) [1]. По этим же направлениям устанавливаются струнные датчики встроенной штатной системы, ко-

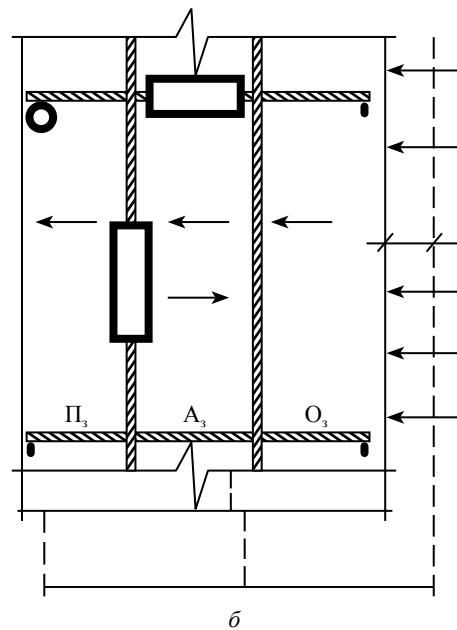


Рис. 2. Схема цилиндрической части оболочки (а) и ее сечения (б) со схемой размещения датчиков:

$f_{\text{в}}$ — меридиональная составляющая усилия от натяжения каната; $f_{\text{о}}$ — окружная составляющая усилия от натяжения каната; $f_{\text{п}}$ — радиальная составляющая усилия от натяжения каната; A_z — активная зона; Π_z — внешняя зона; O_z — зона охвата

торые осуществляют измерение деформаций в бетоне и напряжений в армокаркасе оболочки.

Примем в качестве рассматриваемого окружное направление контроля. При этом допустим, что здесь формируется только одноосное сжатие вдоль горизонтального сечения ЗГО. Тогда получим:

$$\sigma_{\text{пред}} = E \frac{C_0 - C_{\text{пред}}}{C_0}; \quad \sigma_{\text{исп}} = E \frac{C_0 - C_{\text{исп}}}{C_0}, \quad (2)$$

где C_0 — длина горизонтальной окружности ЗГО в некотором ее сечении до преднапряжения; $C_{\text{пред}}$ — длина той же окружности после проведения полной программы преднапряжения; $C_{\text{исп}}$ — длина той же окружности в период ее испытания при наборе максимального внутреннего давления (4,6 атм.); E — модуль упругости.

Учитывая, что $C_0 = 2\pi R_0$, $C_{\text{пред}} = 2\pi R_{\text{пред}}$, $C_{\text{исп}} = 2\pi R_{\text{исп}}$ и подставив эти выражения последовательно в (2), а затем в (1), получим

$$K_0 = \frac{R_0 - R_{\text{пред}}}{R_0 - R_{\text{исп}}}. \quad (3)$$

Использовать формулу (3) следует в преобразованном виде. Поскольку R_0 , $R_{\text{пред}}$, $R_{\text{исп}}$ определяются в разное время, в разных условиях, и следовательно, для сведения к минимуму влияния различных физических процессов сопутствующих деформационному на вычисление коэффициента запаса прочности, например, ползучести и усадки бетона, выполним следующее:

$$K_0 = \frac{R_0 - R_{\text{пред}}}{(R_0 - R_{\text{пред}}) - (R_{\text{исп}} - R_{\text{пред}})} \quad (4)$$

или

$$K_0 = \frac{\Delta R_{\text{пред}}}{\Delta R_{\text{пред}} - \Delta R_{\text{исп}}}. \quad (5)$$

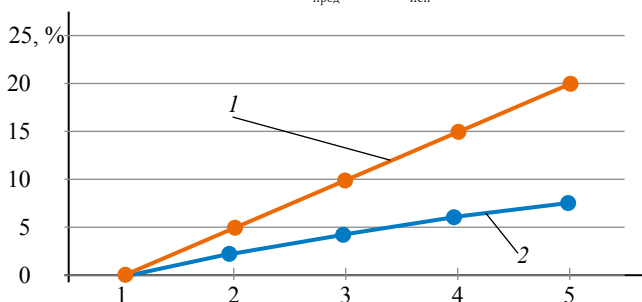


Рис. 3. Значение величин ползучести (1) и ошибок определения коэффициента запаса прочности в процентном отношении к нормативной величине (2)

Перемещения контролируемых точек ЗГО $\Delta R_{\text{пред}}$, $\Delta R_{\text{исп}}$ определяются по результатам измерений, выполненных на этапах: до преднапряжения R_0 ; непосредственно перед испытаниями $R_{\text{пред}}$; при наборе максимального внутреннего давления $R_{\text{исп}}$. При этом $\Delta R_{\text{пред}}$ включает как собственно величины перемещения точек, так и геометрические параметры ползучести и усадки бетона стенки оболочки. А $\Delta R_{\text{исп}}$ включает только величины перемещения точек. Исследуя влияние вышеописанных процессов, сопутствующих деформационному, на вычисление коэффициента запаса прочности по формуле (5) использовали завышенные, примерно в два раза, величины перемещений. При этом получили, что при ползучести и усадке бетона, составляющей 20% значения величины перемещения, ошибка коэффициента запаса прочности составила 7,6% нормативной величины коэффициента запаса прочности (рис. 3).

При использовании реальных величин перемещений, полученных при строительстве первого, второго и третьего энергоблоков Ростовской АЭС определили, что ошибка коэффициента запаса прочности не превысила 3% нормативной величины коэффициента запаса прочности [2, 3]. Таким образом, предлагаемый подход минимизирует до незначительного влияние величины ползучести и усадки бетона на определение коэффициента запаса прочности.

Согласно требований СП-52-102-2004 к предварительно напряженным железобетонным конструкциям $K_0 \geq 1,5$ на всех этапах эксплуатации начиная с преднапряжения. При этом после испытаний определенный по результатам коэффициент K_0 принимается начальным. До испытаний, имея $\Delta R_{\text{пред}}$, можно вычислить все ожидаемые минимальные допустимые величины перемещений и использовать их в период испытаний для контроля этого процесса по соответствующим полкам давления. Отметим, что полкой давления является заданный программой испытаний уровень формируемого внутреннего давления ЗГО. При этом первоначально имея

$$1,5 \leq \frac{\Delta R_{\text{пред}}}{\Delta R_{\text{исп}}^*},$$

где $\Delta R_{\text{исп}}^* = \Delta R_{\text{пред}} - \Delta R_{\text{исп}}$.

Для максимального давления 4,6 атм. определим $\Delta R_{исп(4,6)}^* \leq 0,667 \Delta R_{пред}$.

Далее для всех остальных полков давления получим:

$$\Delta R_{исп(x_i)}^* \leq \Delta R_{исп(4,6)}^* \frac{x_i}{4,6},$$

где x_i — значение давления на соответствующей полке при испытании.

После сдачи оболочки в эксплуатацию ежегодно определяются величины годовых перемещений исследуемых точек δR_i . Тогда текущий коэффициент на любом этапе эксплуатации ЗГО определяется

$$K_i = \frac{\Delta R_{пред} + \sum_{i=1}^n \delta R_i}{\Delta R_{исп}^*}. \quad (6)$$

Здесь $f_{дег} = \Delta R_{пред} + \sum_{i=1}^n \delta R_i$ является функцией деградации ЗГО, при этом

$$d_i = \frac{K_i}{K_0}, \quad (7)$$

где d_i — параметр, определяет запас текущего ресурса ЗГО.

Таким образом, имея перемещения исследуемых точек на соответствующих этапах существования ЗГО обеспечивается возможность оценки его технического состояния и определения остаточного ресурса объекта независимо от встроенной штатной системы контроля [4–6]. Коэффициент K_0 вычисляется по формуле (5). При эксплуатации оболочки ежегодно определяют K_i , который вычисляется по формуле (6) и коэффициент запаса текущего ресурса d_i (7). При этом руководствуется следующим, если $d_i \geq 1$, то ЗГО соответствует всем требованиям (прочности, уровню обжатия, напряжения в армокаркасе), при $0,67 \leq d_i < 1$ ЗГО не соответствует нормативным требованиям и находится в недопустимо малом сжатом режиме работы, если $d_i < 0,67$, то ЗГО не соответствует уровню обжатия, она находится в режиме растяжения, следствием чего является возможное трещинообразование. Последнее условие требует выполнения оценки прочности защитной оболочки на основе проверки прочности сечений, выполняемой в соответствии с ПНАЭ Г-10-007-89, СП 52-01-2003, СНиП 2.03.01-84, СНиП 2.03.04-84 и СН ПБ № NS-G-1/10 [7–11].

Приведенный подход к оценке технического состояния по коэффициенту запаса прочности справедлив для всех строительных элементов защитных герметичных оболочек проектов НП-1000 АЭС с реактором ВВЭР-1000 и АЭС-2006. При этом контроль величин изменения радиусов ЗГО обеспечивается мобильной геодезической диагностической системой, которая является полностью независимой от штатной встроенной системы мониторинга и независимой от фактора времени, т.е. обеспечивает способность оценить техническое состояние оболочки на любом этапе ее существования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Кирильчик Л.Ф. Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки АЭС при ее преднапряжении и испытании // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2014, №1. — <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263>.
2. Забазнов Ю.С., Ключин Е.Б., Пимшин Ю.И. Геодезическое обеспечение мониторинга технического состояния защитных герметичных оболочек атомных электрических станций (АЭС) в период их строительства, преднапряжения и испытания / Сб. статей по итогам научно-технических конференций, посвященных 235-летию МИИГАиК. Вып. 7. — Ч.1.—М. МИИГАиК, 2014. — С. 19–23.
3. Гайрабеков И.Г., Пимшин Ю.И., Губеладзе О.А., Медведев В.Н. Результаты выполненных работ в рамках мониторинга защитных герметичных оболочек строящихся блоков Ростовской АЭС / Сб. статей по итогам научно-технических конференций, посвященных 235-летию МИИГАиК. Вып. 7. — Ч.1. — М. МИИГАиК, 2014. — С. 29-30.
4. Способ определения деформационных характеристик сооружений / Пимшин Ю.И., Наугольнов В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В.: Патент 2426089 РФ., МПК G01 M 99/00. опубли. 10.08.2011, бюл. №22. <http://www.fips.ru>, <http://bankpatentov.ru/node/117239>.
5. Способ определения деформационных характеристик защитной герметичной оболочки / Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю.: Патент 2546990 РФ., МПК G01 M 99/00, опубли. 10.04.2015, бюл. №10. <http://www.fips.ru>.
6. Способ оценки эксплуатационной надежности защитной герметичной оболочки реакторного отделения АЭС / Пимшин Ю. И., Ключин Е. Б., Забазнов Ю. С., Губеладзе О. А., Пимшин П. Ю.: Патент 2577555 РФ., МПК G01 M 99/00, опубли. 20.03.2016, бюл. №8. <http://www.fips.ru>.
7. Нормы проектирования железобетонных конструкций локализирующих систем безопасности атомных станций. ПНАЭ Г-10-007-89. — М.: Госатомэнергонадзор СССР, 1991.
8. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: 1985.
9. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
10. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. М.: 1985.
11. Серия норм по безопасности. № NS-G-1/10, Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных электростанций. МАГАТЕ, Вена, 2008.

Принята к печати 15 марта 2016 г.

Рекомендована кафедрой строительных производств ВИТИ

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

©2016 А.Р. Валиева

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия
Albina.v.85@mail.ru

Аннотация. Деформационные преобразования строительных конструкций – проблема далеко не новая. Ее изучению посвящено множество работ, связанных с описанием, прогнозированием, а также предотвращением дальнейшего развития деформаций. Практика работ по оценке деформации высотных зданий сводится к проведению комплекса геодезических работ, которые позволяют получить трехмерную модель здания и отслеживать изменения в динамике. Применение данных технических средств составляют основу процесса оценки деформационных параметров и параметров преобразования конструкций. Характер деформации высотных зданий напрямую зависит от региона расположения рассматриваемого объекта. Существуют группы факторов, являющиеся крайне неблагоприятными для существования высотных зданий. Одним из таких факторов является сочетание высоких температур со значительными суточными перепадами температур, а также сильным ветром. Такие явления характерны для стран с резко континентальным климатом. Ярким примером такой страны является Узбекистан.
Ключевые слова: высотные здания, деформация, геодезические измерения, методика

JUSTIFICATION FOR APPLYING THE LASER SCANNING TO STRAIN EVALUATION OF HIGH-RISE BUILDINGS

©2016 Valieva A.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia
Albina.v.85@mail.ru

Abstract. The article is dedicated to a problem of structural deformations. Much attention is given to deformation descriptions, forecasting probable distortions and preventing them. Structural deformation analysis includes package of geodetic works that allows to develop a 3D-model of a building and to monitor its changes. The use of these technical resources forms the basis for structural deformation analysis. Structural deformation of tier building depends on its location. There are number of hostilities that could cause damages in tier building structure. It is, for example, a combination of high temperatures, significant diurnal temperature drop and strong wind. Such combination is typical for countries that have severely continental climate. Uzbekistan is one of them.

Keywords: high-rise buildings, deformation, geodetic measurement technique

Деформационные процессы, которые приводят к нарушению высотных конструкций, могут быть вызваны различными факторами. Например, при строительстве сооружения были допущены неточности при учете природных факторов, что в дальнейшем привело к неспособности материала сохранять свои свойства в условиях повышенных температур. В качестве примера можно также привести свойства грунтов, которые под весом высотной конструкции приходят в движение, нарушая тем самым свою целостность и целостность высотной конструкции. Для каждого региона такие факторы различны. Поскольку не все факторы проявляют себя в момент проектирования и строительства, их идентификация также представляет собой довольно сложный процесс. Таким образом, для оперативного принятия

мер по сохранению целостности конструкции необходимо проводить мониторинговые исследования параметров зданий и сооружений [1].

Решение поставленной задачи возможно за счет применения современных методов проведения геодезической съемки высокоточными геодезическими приборами. Отметим, что данные способы съемки ранее не применялись при обследовании зданий за исключением памятников культурного и исторического значения по причине начального этапа развития и становления практического применения в данной сфере.

Мобильная лазерная съемка проводится на скорости до 20 км/ч в прямом и обратном направлениях. Используется сканирующая система, установленная на крыше автомобиля с высокой амортизационной способностью. Для

обеспечения высокой точности измерений по пути следования устанавливаются базовые ГНСС-станции. В рассматриваемом случае целесообразно их установить через каждые 2 км на заранее заложенных опорных пунктах [2]. Совместно со сканированием необходимо вести фотосъемку окружающей территории и самого объекта минимум двумя широкоугольными камерами с частотой съемки, не превышающей 20 кадров в секунду, чтобы не перегружать систему большим объемом данных. Данные с фотокамер необходимы для получения информации об объекте и окружающей обстановке, анализа их характеристик, присвоения истинных цветов точкам и объектам.

В условиях съемки на территории Узбекистана очень важна автоматическая коррекция яркости фотосъемки, а также защита от воздействия резких порывов ветра, с учетом диапазона достаточно широкого для охвата всего объекта и прилегающей территории. Высокая частота сканирования позволяет осуществлять сбор данных без значимых потерь в плотности измерений [3].

Выбор системы мобильного сканирования определяется также тем, что система представляет собой единое устройство, которое исключает дополнительные операции, затраты времени и средств, что при учете того, что район расположения объекта частично является пустынным, особенно важно, поскольку в подобных ситуациях при применении других методов требуется установка дополнительных ориентиров, прокладка сетей и маршрутов. Также исключена раскалибровка системы при эксплуатации и монтаже. Отпадает необходимость определения калибровочных параметров перед началом съемки, то есть калибровка проводится с ориентиром на высокоточные стандарты.

После выполнения съемки и обработки данных сканирования обязательно проведение контроля, при котором используются реперные объекты, закрепленные в характерных точках на телебашне: точках на опорах конструкции. Контроль данных производится путем совмещения уравненного облака точек лазерного отражения (ТЛО) с реперными объектами.

В результате мобильной лазерной съемки получается следующий набор данных [4]:

ТЛО; геопривязанные фотографии; траектории движения сканирующей системы; данные GNSS-наблюдений на базовых станциях.

После обработки данных создаются: 3D-модель местности в формате AutoCAD и ArcGIS с занесением в базу данных атрибутивных характеристик; цифровые модели объектов инфраструктуры железных дорог; цифровые модели рельефа в формате ESRI GRID и ASCII; топографические планы масштаба 1:1000; классифицированные ТЛО.

По результатам обработки данных решаются следующие задачи:

- создание комплексной системы пространственных данных структуры объекта (телебашни);

- построение продольных и поперечных профилей;

- планирование и прогноз деформационных преобразований;

- анализ параметров объектов структуры сооружения и сопоставление их с нормативными значениями;

- выявление участков на телебашне, требующих ремонта или реконструкции;

- вычисление критически опасных значений;

- инвентаризация структурных элементов.

Существует одна важная деталь, которую нельзя упускать при сканировании телебашни ввиду специфики архитектурных решений – это «теневые» зоны, неизбежно возникающие по ходу следования сканирующей системы, именно поэтому система использует дополнительную фотосъемку, которая позволяет при помощи оцифрованных снимков получить модель «теневой» зоны.

Практическое воплощение способа реализуется следующим образом: лазерный сканер закрепляется на крыше автомобиля, в кузов которого садится инженер-геодезист, который отслеживает процесс съемки, а также оперативно реагирует на возможные внештатные ситуации. Система снабжена ноутбуком, при помощи которого по беспроводной сети с прибором ведется наблюдение. Маршрут автомобиля прокладывается по спирали от проекции центра вышки на фундамент с началом от ближайших стационарных объектов (около 300 м) для использования закрепленных меток.

Постепенное движение по спирали позволит получить облако точек с повышением плотности, а следовательно, и точности, к вершине башни, что позволит создать наиболее близкую к реальности трехмерную модель. Движение машины должно происходить со скоростью не выше 10 км/ч даже при учете высокой скорости сканирования обстановки. Расстояние между витками спирали не менее 20, но не более 35 м. В случае отклонения от намеченной трассы при первичном замере съемку необходимо прекратить и продолжить после устранения препятствия.

С каждой спирали сканирования получается свыше 1000 «снимков», которые при помощи программного обеспечения сортируются, откидываются повторяющиеся до заданного заранее количества. При этом, чем выше точка замера от основания, тем большее количество повторов должно сохраняться в системе. Примерное время, затрачиваемое на съемку, составит около 1,5 ч, то есть аренда оборудования не будет дорогостоящей, при этом съемку нельзя заканчивать номинальным завершением: при оповещении программного обеспечения об обнаружении выпадающих измерений съемку нужно повторить по траектории той спирали, на которой обнаружено нарушение. Отметим, что существует зависимость линейного шага сканирования по вертикали от высоты сканера относительно снимаемого объекта, что имеет важное значение при обследовании объектов высотой свыше 50 м (рис. 1) [1].

Для наблюдения за деформациями сооружений на территории Узбекистана целесообразно применять геодезические, наклономер-

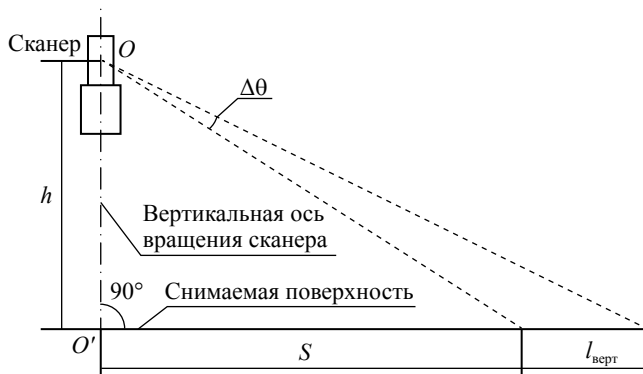


Рис. 1. Зависимость линейного шага сканирования по вертикали от высоты сканера относительно снимаемого объекта [5]

ные и геодинамические методы наблюдений. При этом между ними должна быть установлена самая тесная связь, т.е. для оценки смещений оснований инженерных сооружений следует использовать комплексный подход.

Еще одной проблемой является получение зон «перекрытия», когда одна и та же точка снимается с нескольких ракурсов с отклонением значений в несколько минут. Решение подобной задачи возможно за счет применения ранее упомянутых контрольных марок, заранее привязанных к пунктам опорной сети с точностью 1–2 см [5]. Такой метод позволил повысить точность получаемых данных. Затем для полного совмещения всех видов данных применяются связующие точки, выбираемые в зонах перекрытия данных. В качестве исходной информации для набора связующих точек используют точки лазерных отражений мобильного сканирования. Для каждой точки стояния наземного сканера (сканпозиции) выбирается не менее пяти связующих точек и не менее трех контрольных, заранее замаркированных на местности. Для совмещения данных цифровой съемки и мобильного сканирования необходимо использовать не менее трех связующих и одну контрольную точку на 0,5 погонного километра. В качестве контрольных точек в этом случае будут выступать четко распознаваемые углы строений и разнообразных конструкций, а также вешки на опорах башни. В результате абсолютная точность совмещения данных разных видов съемки с данными мобильного сканирования составляет не более 5 см.

В настоящее время создается единая ГИС-система, в которой будет осуществлена интеграция различных видов сканирования 3D-моделей высотных зданий с базами данных. Ее преимущество, достигаемое за счет работы с данными в трехмерном пространстве. Мобильное лазерное сканирование в настоящее время не достигло реализации всего спектра возможностей, тем не менее, в случае анализа деформации здания телебашни на территории Узбекистана, точность метода не только достаточна, но и наиболее эффективна в применении, так как ни один из существующих методов не позволяет решить проблему слепых зон, которые при учете структуры объекта, являются наиболее серьезной проблемой.

В целом применение мобильного сканирования для изучения деформации высотных сооружений в настоящее время не применялось, но полученные результаты с применением данного метода не раз доказали, что технология не требует дополнительных методов съемки и сканирования, в отличие от уже зарекомендовавших себя способов получения данных о пространственных характеристиках объекта.

Рассмотрим общую эффективность предлагаемого метода в сравнении с классическими методиками геодезического мониторинга. На рис. 2, 3 приведены примеры практической реализации способов, которые активно применяются при мониторинге целостности фасадов здания.

Первый способ — это проведение тахеометрической съемки с применением современных тахеометров, оснащенных лазерным дальномером. Серьезным недостатком данной съемки является необходимость закрепления отражателей на самой конструкции, что далеко не всегда возможно реализовать через необходимые промежутки для обеспечения точности измерений. Такие интервалы возникают на высоте от 120 до 190 м. Данный интервал весьма значителен, что приведет к возникновению ошибок. При наличии таких интервалов отклонение согласно паспорту прибора увеличивается до 80% [2].

Следующий способ заключается в применении спутниковых съемок для получения снимков телебашни с привязкой координат (см. рис. 3). Данный метод не может считаться эффективным, поскольку в основании башни находится «теневая зона», которую невозможно оценить с помощью спутниковой съемки и часть результатов съемки будет недействительна.

Проведем анализ изменения погрешности от высоты расположения точек замеров. Точки замеров располагаются на расстоянии 30 м друг от друга. При этом для спутниковой съемки до 120 м расположена теневая зона, а для тахеометрической съемки на двух промежутках такое расположение отражателей невозможно (рис. 4).

При условии минимальной погрешности при измерении лазерным сканером величина погрешности остается постоянной по причине отсутствия теневых зон для лазерного ска-

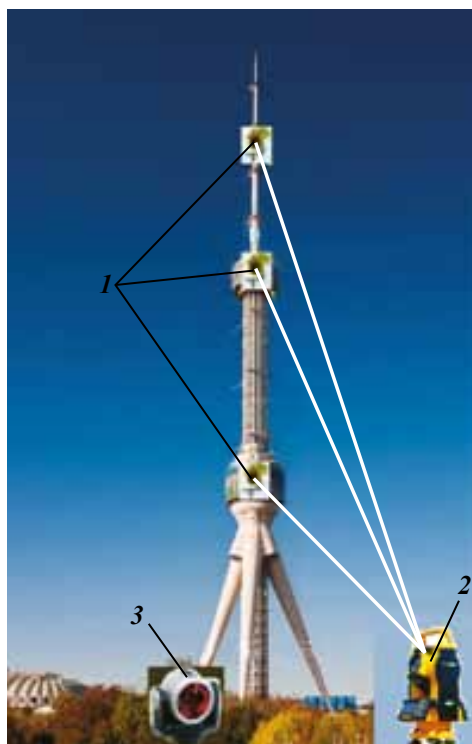


Рис. 2. Расположение оборудования при тахеометрической съемке:

1 — мониторинговые отражатели; 2 — тахеометр; 3 — опорные отражатели



Рис. 3. Мониторинг деформации высотных зданий с применением спутниковых систем:

1 — точка мониторинга; 2 — базовая станция

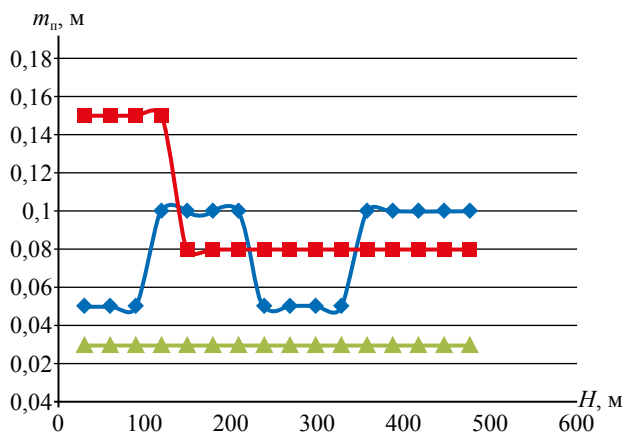


Рис. 4. Изменение величины погрешности прибора (m_n) в зависимости от высоты расположения точек на телебашне:

— тахеометрическая съемка; — спутниковая съемка; — лазерное сканирование

нера. Таким образом, применение мобильного лазерного сканирования — это наиболее эф-

фективный и показательный метод получения деформационных характеристик здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаров Б.Ф. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2011. – № 1. – С. 19–29.
2. Афонин Д.А. Оптимизационная модель выбора схемы плановой геодезической разбивочной сети на застроенной территории // Геодезия и картография. – 2011. – № 9. – С. 16–22.
3. Гуляев Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений: монография. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 256 с.
4. Бугакова Т.Ю. Оценка устойчивости состояний объектов по геодезическим данным методом фазового пространства: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Новосибирск, 2005. – 163 с.
5. Веселов В.В., Есенников О.В., Сячинов А.Н. О разрядном нивелировании // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2010. – №2 (25). – С. 87–93.

Принята к печати 5 апреля 2016 г.
Рекомендована кафедрой геодезии МИИГАиК

ПРОБЛЕМАТИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КАДАСТРОВОГО УЧЕТА В РФ

©2016 А.М. Лелюхина, А.С. Смородина, О.В. Миклашевская

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия
miklashevski2004@yandex.ru, anmeh@yandex.ru, annyissoanny@gmail.com

Аннотация. Приведен анализ текущего состояния системы кадастрового учета и регистрации прав в Российской Федерации, а также наиболее распространенные ошибки, возникающие при постановке объектов недвижимости на кадастровый учет и приводящие к вынесению решений о приостановлении кадастрового учета или об отказе в его осуществлении. Рассмотрены не только положения нормативно-правовых актов, устанавливающие определенный перечень случаев, в которых производится приостановление кадастрового учета или отказ в его осуществлении, но и иные технические и технологические проблемы, выявляемые при ведении Государственного кадастра недвижимости и эксплуатации специализированного программного обеспечения, используемого в территориальных подразделениях органа кадастрового учета.

Ключевые слова: объекты недвижимости, кадастровый учет, Ведение Бизнеса, проблемы кадастрового учета, кадастровый инженер, решения о приостановлении и об отказе в осуществлении кадастрового учета, ЭЦП, электронный документооборот

PROBLEMS OF IMPROVING THE FUNCTIONING OF THE SYSTEM OF CADASTRE REGISTRATION IN THE RUSSIAN FEDERATION

©2016 Lelukhina A., Smorodina A., Miklashevskaya O.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia
miklashevski2004@yandex.ru, anmeh@yandex.ru, annyissoanny@gmail.com

Abstract. The current state system of cadastre and registration of rights in Russia, as well as the most common errors that occur in the process of cadastral accounting and leading to the decision on the suspension of the cadastral account or about refusal of its implementation are analyzed in this article.

Not only the provisions of legal acts establishing the list of cases which may consist of suspension decisions or refusal of cadastral accounting are considered, but other technical and technological problems that are occurring in the process of keeping the State cadastre of real estate and exploitation of the specialized software installed in the territorial department body of the cadastral accounting.

Keywords: real estate, cadastre, registration, DoingBusiness, problems of cadastral accounting, cadastral engineer, decisions of suspension and refusal decisions in the cadastral accounting, EDS, electronic document exchange

Ежегодное исследование Всемирного банка, результаты которого были опубликованы в очередном Докладе «DoingBusiness 2016» в октябре 2015 г., не могли не порадовать предпринимателей России. Согласно этому отчету среди 189 государств наша страна поднялась на 51 строчку в международном рейтинге по легкости ведения бизнеса. Одним из наиболее важных критериев оценки стран в этом исследовании является показатель «регистрация собственности». По данному пункту Российская Федерация ворвалась в десятку лидирующих стран и заняла 8 место. Улучшение всех составляющих процедур по государственной регистрации прав на объекты недвижимости проводится уже несколько лет в рамках выполнения мероприятий «дорожной карты», утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 2236-р 1 декабря 2012 г. Большая часть работ по данному направлению возложена на Росреестр. Сегодня можно говорить о том, что орган кадастрового учета и регистрации прав успешно реализует поставленные перед ним задачи.

Однако если отвлечься от общей картины и углубиться в технологию процесса регистрации права собственности на тот или иной объект недвижимого имущества, то станет очевидно, что далеко не все еще действует именно так, как этого бы хотелось всем: гражданам, владеющим небольшими участками, жилыми домами или квартирами; компаниям, занимающимся девелоперской деятельностью; органам государственной власти и местного самоуправления, заинтересованным в эффективном управлении земельными ресурсами и городской недвижимостью. Для реального, а не просто рейтингового укрепления позиций в мировом сообществе, улучшения инвестиционного климата и упрощения ведения бизнеса в России предстоит решить еще множество проблем. И по-прежнему наибольшая часть из них сосредоточена в сфере регистрации прав и кадастрового учета.

Как известно, регистрация прав — это юридический акт признания и подтверждения государством возникновения, прекращения, ограничения или перехода прав на недвижимое имущество. Зарегистрировать право на объект недвижимости можно тогда, когда све-

дения о таком объекте были внесены в государственный кадастр недвижимости (ГКН). Это означает, что объект регистрации прав предварительно должен пройти процедуру кадастрового учета для однозначного определения индивидуальных характеристик и местоположения границ такого объекта. На этапе внесения сведений об объекте недвижимости в ГКН и возникает наибольшее количество проблем.

Основные положения порядка проведения кадастрового учета, а также осуществления кадастровой деятельности закреплены в ФЗ-221 «О государственном кадастре недвижимости» от 24 июля 2007 г. (Закон о кадастре [1]). Положительным результатом прохождения процедуры кадастрового учета является внесение сведений о данном объекте в информационный ресурс — ГКН. Отрицательным результатом является отказ в осуществлении кадастрового учета или его приостановление на срок не более чем три месяца со дня вынесения решения о приостановлении. Перечень обстоятельств, при которых кадастровый учет объекта недвижимости может быть приостановлен, приведен в статье 26 Закона о кадастре, а также в разработанном на его основе административном регламенте Росреестра по предоставлению государственной услуги по государственному кадастровому учету, утвержденном приказом Минэкономразвития РФ № 843 от 26 декабря 2014 г. и вступившим в действие 18 апреля 2015 г.. В соответствии с обозначенными нормативно-правовыми актами орган кадастрового учета принимает решение о приостановлении кадастрового учета в случаях, приведенных в табл. 1.

Законом о кадастре установлено, что осуществление кадастрового учета приостанавливается на срок до устранения обстоятельств, послуживших основанием для принятия решения о приостановлении, но не более чем на три месяца. В соответствии со статьей 27 Закона о кадастре орган кадастрового учета принимает решение об отказе в осуществлении кадастрового учета в случаях, приведенных в табл. 2.

В соответствии с Законом о кадастре решения о приостановлении или об отказе в осуществлении кадастрового учета могут быть обжалованы в судебном порядке заявителем или его представителем, а также кадастровым

Основания для приостановления осуществления кадастрового учета

Закон о кадастре, статья 26	Содержание нарушения
п.1, ч.2	Наличие противоречий между сведениями об объекте недвижимости, содержащимися в представленных заявителем документах, и сведениями, содержащимися в ГКН о данном объекте недвижимости
п.2, ч.2	Пересечение границ образуемых (уточняемых) земельных участков с границами земельных участков, сведения о которых содержатся в ГКН
п.3, ч.2	Местоположение помещения, о кадастровом учете которого представлено заявление, в соответствии со сведениями, содержащимися в ГКН, частично или полностью совпадает с местоположением другого помещения
п.4, ч.2	Отсутствие необходимых для кадастрового учета документов
п.5, ч.2	Заявление о кадастровом учете или необходимые документы по форме либо содержанию не соответствуют требованиям Закона о кадастре
п.6, ч.2	Граница образуемого земельного участка пересекает границу территориальной зоны
п.7, ч.2	Граница образуемого (уточняемого) земельного участка пересекает границы муниципального образования или границы населенного пункта
п.8, ч.2	Площадь образуемого земельного участка на десять и более процентов отличается от площади, указанной в утвержденном проекте межевания территории или схеме расположения земельного участка
ч.2.1	Образуемые (изменяемые) земельные участки не обеспечены доступом к землям (земельным участкам) общего пользования

инженером, подготовившим межевой план, технический план, акт обследования, представленные для осуществления кадастрового учета.

Подготовкой документов, необходимых для осуществления кадастрового учета объекта недвижимости, таких как межевые или технические планы, а также оформлением актов обследования для выполнения обратной процедуры (снятия с учета прекративших свое существование объектов капитального строительства) занимаются кадастровые инженеры. В наибольшей степени от их профессионализма, а также от компетентности сотрудников территориальных подразделений Росреестра зависит качественное оказание государственной услуги по кадастровому учету объектов недвижимого имущества, необходимой для дальнейшей регистрации прав. Таким образом, между непосредственным получателем государственной услуги (гражданином или организацией) и государственным регистратором стоит еще, как минимум, два лица: это исполнитель кадастровых работ и контролирующий их выполнение специалист органа кадастрового учета. В связи с тем что сфера кадастра и регистрации имеет целый ряд специфических особенностей, в процессе кадастрового учета и кадастровый инженер, и сотрудник территориального подразделения органа кадастрового

учета сталкиваются с многочисленными трудностями, практически всегда оценивая одну и ту же неразрешимую проблему с диаметрально противоположных точек зрения. Во многом это связано с отсутствием или противоречием конкретных норм законодательства, регламентирующих тот или иной вопрос, а также недостатком не только опыта, но и необходимых теоретических и практических знаний у каждой из сторон взаимодействия. При этом локальные споры между специалистами Росреестра и кадастровыми инженерами, выполнявшими кадастровые работы, возникают все чаще и чаще. Страдают же от этого рядовые граждане, а также предприятия малого, среднего и крупного бизнеса, испытывающие трудности с вовлечением принадлежащих им объектов недвижимости в оборот в связи с несвоевременно оказанной государственной услугой.

Для кадастрового инженера вынесение решения о приостановлении государственного кадастрового учета имеет ряд неблагоприятных последствий, поскольку не просто увеличивает сроки выполнения работ, но и влечет за собой применение системы штрафов и неустоек.

Проведение анализа наиболее часто встречаемых ошибок, допускаемых кадастровыми инженерами и сотрудниками органа кадастрового учета, выявление реальных причин принятия решений о приостановлении кадастрового

Основания для отказа в осуществлении кадастрового учета

Закон о кадастре, статья 27	Содержание нарушения
п.1, ч.2	Имущество, о кадастровом учете которого представлено заявление, не является объектом недвижимости, учет которого предусмотрен Законом о кадастре
п.3, ч.2	Объект недвижимости образуется из другого объекта недвижимости или объектов недвижимости в случаях, когда действие с преобразуемым объектом недвижимости или преобразуемыми объектами недвижимости не допускается в соответствии с Законом о кадастре
п.4, ч.2	Объект недвижимости образован из другого объекта недвижимости, внесенные в ГКН сведения о котором носят временный характер
п.5, ч.2	С заявлением о кадастровом учете обратилось ненадлежащее лицо
п.6, ч.2	Истек срок приостановления осуществления кадастрового учета и обстоятельства не были устранены
п.7, ч.2	Документы, необходимые для кадастрового учета, заверены подписью неуправомоченного лица
п.8, ч.2	Ответ органа государственной власти или органа местного самоуправления на межведомственный запрос свидетельствует об отсутствии документа и (или) информации
п.9, ч.2	На момент подачи заявления о кадастровом учете земельного участка истек срок действия утвержденной схемы расположения земельного участка или земельных участков на кадастровом плане территории
п.2, ч.3	Размер образуемого или измененного земельного участка не соответствует установленным предельным (минимальным или максимальным) размерам земельных участков
п.6, ч.3	Земельный участок образован из земельных участков, относящихся к различным категориям земель
п.7, ч.3	В орган кадастрового учета поступили возражения относительно размера и местоположения границ земельного участка, выделяемого в счет доли или долей в праве общей собственности на земельный участок из земель сельскохозяйственного назначения
п.8, ч.3	Площадь земельного участка, выделяемого в счет доли или долей в праве общей собственности на земельный участок из земель сельскохозяйственного назначения, более чем на десять процентов превышает площадь, указанную в утвержденном проекте межевания земельного участка
п.9, ч.3	Граница земельного участка не считается согласованной, если такое согласование предусмотрено Законом о кадастре
ч.4	Изменение площади или описания местоположения границ земельного участка не обусловлено образованием земельного участка или уточнением его границ
п.1, ч.5	Значение уточненной площади земельного участка превышает значение площади, содержащееся в ГКН, на десять и более процентов или величину предельного минимального размера
п.2, ч.5	Нарушен установленный Законом о кадастре порядок согласования местоположения границ земельных участков
ч.6	Земельный участок не является преобразуемым и не подлежит снятию с учета
ч.7	Помещение не изолировано или не обособлено от других помещений в здании или сооружении

учета необходимо для разработки единой методики работы во всех регионах нашей страны.

Существующая технология определяет, что все документы, содержащие результаты кадастровых работ, оформляются и предоставляются в орган кадастрового учета в виде электронных файлов в формате xml, структура которых должна строго соответствовать утвержденным Росреестром xml-схемам. В связи с тем что практически для каждого кадастрового инженера более привычен вид бумажного документа, наибольшее количество проблем, связанных с вынесением решений о приостановлении кадастрового учета, возникает по причине подготовки электронного документа,

имеющего неверную структуру. Это приводит к тому, что в процессе выполнения форматно-логического контроля (ФЛК) xml-документ не обеспечивает контроль и считывание представленных данных, а, значит, загрузка сведений из него в базу данных автоматизированной информационной системы ГКН (АИС ГКН) не может быть успешно осуществлена.

Несмотря на то, что существуют различные способы подачи документов, традиционным, как и прежде, является личное обращение заявителя в территориальное подразделение Росреестра. При этом появляются дополнительные факторы, которые могут стать препятствием для получения положительного

результата загрузки предоставленного xml-документа в учетную систему АИС ГКН. Это связано с необходимостью внесения данных с помощью программного комплекса «Прием/выдача документов» (ПК ПВД). На этом этапе допускается множество ошибок как по вине заявителя, так и по вине сотрудника, занимавшегося обработкой документа. Наиболее распространенной проблемой при личной подаче документов на электронном носителе в настоящее время является несоответствие типа заявления виду электронного документа [2].

Доступное в настоящее время электронное взаимодействие с Росреестром посредством веб-сервисов или через официальный сайт ведомства позволяет исключить подобные ошибки. Но ни встроенные проверки на форматно-логический контроль, осуществляемые на портале Росреестра при отправке документов в электронном виде, ни сервисы предварительной проверки не дают в настоящее время стопроцентной уверенности успешного прохождения ФЛК и загрузки сведений из межевого или технического плана в АИС ГКН. Объясняется это в первую очередь тем, что форматно-логический контроль состоит из двух этапов: первый — это проверка электронного документа на соответствие структуре утвержденной для его подготовки xml-схемы, второй — это проверка на соответствие внесенных сведений актуальным данным ГКН. В связи с несовершенством разработанных и утвержденных Росреестром xml-схем, несвоевременным обновлением программного обеспечения АИС ГКН и отсутствием четкого понимания электронного формата предоставления данных как среди кадастровых инженеров, так и среди сотрудников органа кадастрового учета, наибольшие сложности в настоящее время возникают при подготовке электронного документа и его дальнейшей обработке. При этом если кадастровый инженер не всегда точно осознает какую именно структуру должен иметь оформляемый им электронный документ, то контролирующий выполнение кадастровых работ сотрудник органа кадастрового учета зачастую вообще не имеет представления о том, какую форму для корректной загрузки в АИС ГКН должен иметь xml-документ. Это объясняется тем, что несмотря на существующие

разработанные и утвержденные Росреестром описания используемых электронных форматов, проверка подготовленных в соответствии с ними xml-документов осуществляется по требованиям приказов Минэкономразвития РФ, предъявляемым к бумажным аналогам таких документов. В связи с этим большая часть кадастровых инженеров формирует xml-документ, ориентируясь на актуальный печатный вид этого документа, а не на структуру действующей xml-схемы. Отсутствие понимания структуры xml-схемы приводит к тому, что большая часть электронных документов для постановки объектов недвижимости на кадастровый учет подготовлена с ошибками, не позволяющими пройти проверку на форматно-логический контроль [3].

Если проанализировать наиболее распространенные ошибки, допускаемые кадастровым инженером при подготовке межевых планов, можно выделить следующие причины, выявляемые в процессе кадастрового учета:

1) наложение границ на смежные земельные участки;

2) нарушение правил топологии при описании пространственных объектов, что приводит к целому ряду ошибок: отсутствию замыкания контуров полигональных объектов, наличию повторяющихся точек в границах внешних и внутренних контуров, самопересечений полигонов, наложений частей сложного полигона, выявлению пиковых узлов, наложений друг на друга существующих и новых контуров многоконтурных объектов, а также обособленных участков единого землепользования;

3) описание вновь образованных в процессе выполнения кадастровых работ контуров многоконтурных земельных участков как уже существующих с указанием учетных номеров, которые еще не были присвоены органом кадастрового учета и по этой причине отсутствуют в базе данных ГКН;

4) несоответствие площади участка, указанной в межевом плане, площади пространственного объекта, построенного по приведенным координатам;

5) отсутствие обеспечения доступа к земельному участку или, напротив, излишнее указание доступа к земельному участку общего пользования;

6) оформление разделов графической части без учета предъявляемых к нему требований;

7) несоответствие сведений о частях земельного участка сведениям ГКН;

8) неверное указание описания местоположения объекта или присвоенного ему в установленном порядке адреса;

9) внесение в межевой план ошибочных кадастровых номеров участков, кварталов, объектов капитального строительства, в том числе указание в качестве расположенного на земельном участке объекта капитального строительства кадастрового номера не здания, сооружения или объекта незавершенного строительства, а помещения;

10) необоснованное увеличение площади уточняемого земельного участка более чем на 10% или на установленное значение предельно-го минимального размера земельного участка;

11) необоснованное внесение изменений в конфигурацию и местоположение границ уточненного земельного участка;

12) отсутствие в составе межевого плана по образованию участка из земель государственной или муниципальной собственности схемы расположения земельного участка на кадастровом плане территории, оформленной в виде электронного документа, заверенного электронной цифровой подписью представителя органа местного самоуправления.

В отношении технических планов наибольшее количество решений о приостановлении вынесено по причине:

1) отсутствия среди исходных данных реквизитов документов, предварительно запрошенных в органе кадастрового учета в виде кадастровых планов территорий или кадастровых выписок и содержащих актуальные сведения ГКН;

2) выполнения топологически неверного описания сложносоставных сооружений, состоящих из нескольких контуров различного типа: полигональных, линейных и окружностей;

3) несоответствия сведений, указанных в разрешительной, проектной документации или декларации, сведениям, внесенным в технический план;

4) выбора неверного способа образования и отсутствия списка кадастровых номеров пре-

образуемых объектов при проведении реконструкции;

5) формирования единого технического плана в отношении здания и всех расположенных в нем помещений, в случае если такое здание не является многоквартирным домом;

6) отсутствия указания адреса или описания местоположения объекта в структурированном виде;

7) несоблюдения требований, предъявляемых к оформлению разделов графической части, в том числе к их формату.

Для того чтобы избежать всех этих ошибок кадастровый инженер должен максимально подробно проанализировать исходные данные, учесть особенности действующих xml-схем, правильно определить вид объекта кадастровых работ.

Стоит заметить, что с определением вида объекта, а также его текущего статуса в ГКН возникает множество трудностей. Это связано в первую очередь с отсутствием знаний терминов: «многоконтурный земельный участок», «единое землепользование», «часть земельного участка», «обособленный участок», «условный участок», «здание», «сооружение», «часть жилого дома», «помещение». Множество трудностей возникает и на этапе определения непосредственно вида выполняемых кадастровых работ, а значит сложности есть и с определением вида структуры электронного межевого или технического плана: для первичной постановки на кадастровый учет или для внесения изменений в сведения ГКН о каких-либо его существующих характеристиках. «Что я делаю: постановку на учет или изменение существующего объекта?» – этот вопрос возникает у кадастровых инженеров как при производстве кадастровых работ в связи с выделом земельного участка или его разделом с сохранением исходного в измененных границах, так и при реконструкции объектов капитального строительства. Выбор неверного вида кадастровых работ влечет за собой подачу неверного вида заявления, по которому, в конечном счете, выносится решение об отказе со стороны органа кадастрового учета.

Нужно сказать, что решений о приостановлении кадастрового учета по причине отсутствия электронных цифровых подписей

кадастровых инженеров, подготовивших пакет документов с межевым или техническим планом, становится все меньше. Им на смену приходят другие решения о приостановлении кадастрового учета в связи с внедрением в АИС ГКН автоматической проверки на выявление несоответствия сведений о кадастровом инженере, содержащихся в электронной цифровой подписи (ЭЦП) и представленном для учета xml-документе. На наличие расхождений проверяются фамилия, имя и отчество кадастрового инженера, а также номер его квалификационного аттестата. Таким образом, в сложившейся ситуации обозначенная проблема может быть результатом ошибки как удостоверяющего центра, выпустившего усиленный квалифицированный сертификат ЭЦП с ошибочными данными подписанта, так и самого кадастрового инженера, внесшего неверные сведения о себе в xml-документ межевого, технического плана или акта обследования. Помимо этого, к рассматриваемой проблеме может привести неверно выбранная кодировка при создании файла подписи, наличие множества неидентичных друг другу записей об одном и том же кадастровом инженере в базе данных АИС ГКН, отсутствие криптопровайдера или его некорректная работа на рабочем месте специалиста органа кадастрового учета. Несмотря на это, автоматическая проверка сведений о кадастровом инженере не является критичной и может быть проигнорирована для дальнейшей загрузки xml-документа в учетную систему. Важно и то, что в настоящее время нет требований законодательства, которые бы фиксировали обязательное внесение в состав сертификата ЭЦП номера аттестата кадастрового инженера. Это говорит о том, что при отсутствии в сертификате ключа ЭЦП сведений о номере аттестата кадастрового инженера или при выявлении в нем ошибки, орган кадастрового учета не может выносить решение о приостановлении кадастрового учета по данной причине.

С каждым годом взаимодействие с Росреестром все больше смещается в сторону электронного документооборота, который детально продуман и позволяет избежать большинства проблем, регулярно возникающих при личном обращении заявителя в орган кадастро-

вого учета с заявлением на бумажном носителе. Однако электронный способ подачи документов все же пока не может быть использован во всех ситуациях. Так, например, при отсутствии ЭЦП правообладателя или сканированного образа доверенности, заверенного ЭЦП выдавшего ее нотариуса, нельзя передать электронное заявление об учете изменений стоящего на кадастровом учете объекта недвижимости. При невыполнении обозначенных условий по такому заявлению будет получено решение об отказе в осуществлении кадастрового учета изменений, поскольку представленное заявление не заверено правообладателем объекта недвижимости или его представителем.

В общем и целом, при анализе наиболее распространенных ошибок и причин приостановления кадастрового учета нельзя забывать и об огромном количестве накопленных в сведениях ГКН кадастровых ошибок, выявляемых и исправляемых кадастровыми инженерами параллельно с постановкой объектов на кадастровый учет или внесением изменений в сведения о стоящих на учете объектах. Неопределенность процедуры установления факта наличия кадастровой ошибки в сведениях ГКН, а также отсутствие перечня необходимых мероприятий по подтверждению этого факта и обоснования исправления ошибки приводит к тому, что значительное количество решений о приостановлении или отказе в осуществлении кадастрового учета до сих пор решается только в судебном порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Федеральный закон*. О государственном кадастре недвижимости : федеральный закон от 24 июля 2007 г. № 221-ФЗ (в ред. от 01.05.2016) / Собрание законодательства РФ. – 2007 г. – № 31. – Ст. 4017 : <http://www.pravo.gov.ru/> – 2016 г.
2. *Мамаева Е.Ю., Миклашевская О.В.* Проблематика постановки на учёт объектов капитального строительства / Сборник статей по итогам научно-технических конференций. – 2014. – Вып. 7. – Ч. II. – С. 28–31.
3. *Смородина А.С.* Современный порядок осуществления государственного кадастрового учета. Подготовка документов, необходимых для кадастрового учета, в виде xml-схем и электронного документооборота / Сборник статей по итогам научно-технических конференций. – 2014. – Вып. 7 – Ч. II. – С. 32–33.

*Принята к печати 26 февраля 2016 г.
Рекомендована кафедрой кадастра
и основ земельного права МИИГАиК*

МЕЖЕВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПЕРВОЙ ГУБЕРНИИ РОССИИ

©2016 Т.В. Илюшина

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия
tilyushina@yandex.ru

Аннотация. Рациональное использование природных ресурсов представляется актуальной современной проблемой, решение которой возможно на основе анализа многовекового опыта развития государственного межевания, его геодезического обоснования и картографического обеспечения. В статье рассмотрены вопросы освоения и межевания земель первой губернии Российской империи, учрежденной Петром I в 1708 г., и имеющие важное практическое значение для развития межевания в других губерниях государства, а также для всех вновь присоединенных земель, входящих в состав Российской империи.

Ключевые слова: Ижорская земля, Ингерманландия, Ингрия, межевание, геодезические съемки, природные ресурсы

SURVEYING AND MAPPING OF THE FIRST PROVINCE IN RUSSIA

©2016 Tilyushina T.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia
tilyushina@yandex.ru

Abstract. Rational use of natural resources appears to be the actual problem, the solution of which is possible via analyzing the centuries-old experience of development of public land surveying, geodetic studies and mapping. The article describes questions of land development and demarcation of the first province in the Russian Empire, established by Peter I in 1708. Those questions have practical importance for the development of land survey in other provinces within the country, and for all newly joined lands of the Russian Empire.

Keywords: Izhora land, Ingermanland, and Ingria, the land survey, geodetic survey, natural resources

XVI–XVII столетия в России — время укрепления её могущества и величайших завоеваний. В том числе, в этот период Россия получила выход к Балтийскому морю. К числу успешных мер в межевании следует отнести первые научные исследования лесных, водных и минеральных ресурсов страны; образование «условных владений»; картографирование территорий, а также межевание вновь присоединенных земель с целью заселения территорий русскими колонистами. Появились первые труды В.О. Киприанова, А.Ф. Шестакова, И.К. Кирилова и В.Н. Татищева, определившие систему географических исследований, рекогносцировочного изучения и описания земель и природных территорий. Проводимые географические описания широко детализировали характеристики и особенности различных природных ресурсов, важных для хозяйственного и экономического использования. Изучение вновь присоединенных земель стало поручаться первым петровским геодезистам, которые развивали математические и геодезические знания, организовывали первые астрономические, триангуляционные, топографические и картографические работы. Сенатом

была утверждена новая Межевая инструкция «Пункты каким образом сочинять ландкарты» (1720), где указан порядок межевания и проведены первые инструментальные съемки.

На основе съемочного обоснования, с 1712 г. было начато межевание вновь присоединенной Ижорской земли или Ингерманландии (швед. — «Ingermanland»; фин. — «Inkeri», «Inkerinmaa»; эстон. — «Ingerimaa»; др.-рус. — «Ингрия», «Ижера», Ижорская земля) — исторического региона, расположенного по берегам р. Невы, ограниченного Финским заливом, р. Нарвой, Чудским озером на западе и Ладожским озером с прилегающими к нему равнинами на востоке. Её границей с Карелией считаются реки Сестра и Смородинка. Исторически Ижорские земли относились к Новгороду (862–1136) и к Новгородской республике (1136–1478), затем вошли в состав Московского княжества (1478–1547) и Русского царства (1547–1583, 1595–1617). По результатам Северной войны (1700–1721), после пребывания под властью Швеции (1583–1595 и 1617–1621 гг.) земли Ингерманландии стали частью Российской Империи. В 1702–1704 гг., когда Ингерманландия была заво-

евана Петром I, и в 1703 г. получила название Ингерманландской земли. В том же 1703 г. в устье р. Невы была заложена будущая столица — Санкт-Петербург. В 1708 г. по указу Петра I была учреждена первая на территории России Ингерманландская губерния, которая впоследствии, в 1710 г., была преобразована в Санкт-Петербургскую. Название Ингерманландская губерния продержалось недолго, но часто встречалось в официальных бумагах в течение всего XVIII в.

Будучи частью территории, прилегавшей к Балтийскому морю, Ингерманландия имела важное стратегическое и экономическое значение. Свободной земли в провинции было в изобилии, территорию Ингерманландии можно было использовать в сельскохозяйственных целях, но для этого требовалось раздать эти земли, ввезти помещиков и крестьян, так как малонаселенная после войны провинция, с болотистой почвой, требовала крупных экономических вложений. Для улучшения экономической и демографической ситуации в разные периоды русского или шведского владычества правительства двух стран стремились поощрять переселение туда колонистов. В результате пустоши сменялись возделанными полями, развивалось животноводство, но в борьбе вероисповеданий и в военные годы, особенно в годы Северной войны (1700–1721 гг.) Ингерманландские земли снова постигало разорение.

Для скорейшего развития этих земель и заселения берегов Невы большая часть земель Ингерманландии была роздана частным лицам, в том числе, подаренные земли царице Екатерине I, царевичу Алексею Петровичу, царевне Наталии Алексеевне и князю А.Д. Меншикову. Земли в границах губернии принадлежали как правителям, так и знаменитым государственным деятелям России. Здесь также селились крестьянские семьи, ремесленники, рабочие из других губерний и уездов, которым давались наделы и особое жалованье. Хозяева земельных участков обязаны были строить дома, развивать хозяйство, иначе их дачи, или «мызы», отнимались обратно. Мызой (эст. *mõis*, фин. *moisio*, латыш. *muiža*, швед. *häff*) называлась отдельно стоящая усадьба с хозяйством или поместьем, служившие основой

административно-территориального деления Ингерманландии. В России термин употреблялся преимущественно в северной, западной и юго-западной части Санкт-Петербургской губернии. Материалы шведского межевания конца XVII в. отражали систему расселения мызами, взятыми в аренду финнами и русскими у землевладельцев-шведов и запустение земель. В 1712 г. земли Ингерманландии были размежеваны [1], и это межевание стало примером нового, экономически выгодного земельного преобразования, и следствием обширной раздачи земель, начатой с целью заселения и освоения территории.

Известны несколько интересных картографических произведений этого времени. Это уникальная шведская карта, одно из последних шведских картографических произведений, показывающее Ингерманландию как часть Шведского королевства. Карта Ингрии 1704 г., Генеральная карта провинции Ингерманландии, скопированная Его королевского величества Главным землемерным управлением в 1704 г. (1:250 000; графический масштаб дан в шведских милях и алнах). На карте показана Ингерманландия в ее официальных границах, разделенная на административные единицы — лен (*Lahn*), погост (*Pogost*), приход (*Sochn*). Нанесены государственные тракты, обозначены города, крепости, селения, церкви, усадьбы, фарватер в устье Невы и на Ладожском озере, болота, озера, малые реки и ручьи. Крупные акватории подписаны, при этом современное Балтийское море имело название «Большое Соленое море». С внешней (южной и восточной) стороны официальной границы Ингерманландии пространно написано: «Здесь граница Великого княжества России», при этом показана и водная граница между Россией и Швецией по Ладожскому озеру. Выполнена под руководством Э. Белинга на основе землемерных (1678–1688), военно-топографических и гидрографических работ. При вычерчивании были уточнены северные территории. В 1704 г. в Стокгольме карту доработал А. Андерсин (источник: Королевская шведская библиотека, Стокгольм, рис. 1.).

Заслуживает внимания и Карта Ингрии 1705 г. А. Шхонебека — первая российская карта Ингрии и Петербурга: «*Географский Чертеж*

над Ижерскою Землей своими Городами уездами Погостми Церквами, Часовнями, Дворами и Деревнями, Совсеми Стоящими Озерами реками и Потоками, Хлебными и Пильными, мельницами и рыбными ловлями и Корабельными пристанищи и протчая. Грыдоровал Адриан ихонбек» (масштаба примерно 1:214 000, рис. 2.). Составлена по шведским источникам сразу после завоевания Ингерманландии в ходе Северной войны 1700–1721 гг. и сохраняет старые названия (источник: Ингрия и Петербург на картах XVIII в.).

Петр I придавал огромное значение географическим и особенно картографическим исследованиям. Высоко ценил и шведские карты Ижорской земли, на которой, по его замыслу, должна была вырасти северная столица Империи — Санкт-Петербург. Сохранился до наших дней и Географический чертеж Ижорской земли — гравюра А. Шхонебека (первого из мастеров гравюры, приглашённых для работы в России). Этот чертеж является первой из известных русских карт, выполненной по заданию Петра I, появление которого в разгар Северной войны было событием, отражающим государственные интересы России (рис. 3). Главное внимание тогда уделялось Ижорской земле, с нанесенными на нее промышленными и торговыми объектами, а в отличие от шведских и финских карт и собственными исследованиями (установленными береговыми линиями озер, рек, протоков и судостроительными верфями; новыми населенными пунктами; путями сообщения; лесными угодьями, государственными границами и пр.).

В соответствии с важнейшими государственными реформами Петра I земельные дела и отношения также претерпели ряд изменений. С преобразованием Поместного приказа в Вотчинную коллегию, и с ликвидацией поместной системы, качественный учет земель и оценка частично утратили свое значение, практика межевания сократилась, положение землевладения ухудшилось, но вместе с тем повысилась точность полевых измерений, основанная на геометрии и применении геодезических инструментов. Структура геометрии позволяла определять расстояния, площади (с помощью астролябий и мерных цепей) и превышения (методом водяного нивелирования



Рис. 1. Карта Ингрии 1704 г.

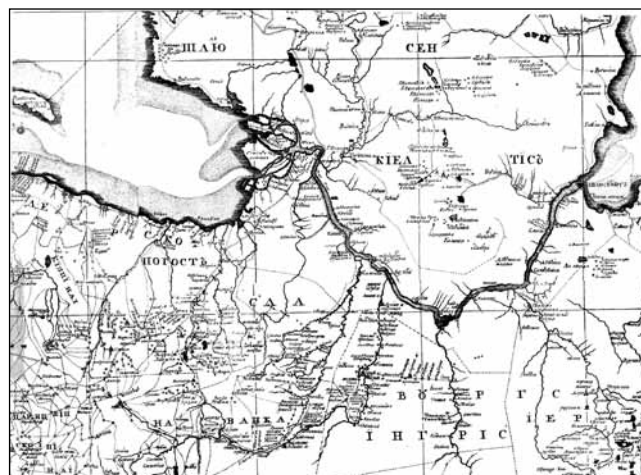


Рис. 2. Географический чертеж Ижорской земли. Ок.1705 г.



Рис. 3. Географический чертеж Ижорской земли. Гравюра А. Шхонебека, посвященная Петру I. 1704 г. РГАДА

и ватерпаса). Межевые действия имели юридическую силу, но если земли не были прописаны в писцовых книгах, межевание проводилось со слов владельцев и свидетелей и не могло полностью решить проблему незаконного захвата земель. На опыте межевания первой Ингерманландской губернии правительство получило возможность совершенствоваться и развивать практику межеваний и развивать систему природопользования. Природопользование стало проводиться на территориях, определяющих по законодательству хозяйственную деятельность.

Состояние картографирования страны также не отвечало новым экономическим, военным и политическим потребностям и требовало изменений. В эпоху Петра географической карте стало придаваться важное государственное значение. Это сформулировано в «Генеральном Регламенте» (1720), написанном Петром I: *«И дабы каждый Коллегиум о состоянии государства и о принадлежащих к оному провинциях подлинную ведомость и известие получить мог, — того ради подлежит в каждой Коллегии иметь генеральные и партикулярные ландкарты, которые по времени изготовлены быть имеют»* (Генеральный Регламент Государственных Коллегий от 28.11.1720 г. Гл. 48: «О ландкартах или чертежах государства»). Руководство А.Ф. Клешина (1723) предусматривало подробные описи природных ресурсов: *«спрашивать надлежит о реках, откуда вытекли и где впали в озеро или в реку...а потом спрашивать о озерах и близ которых деревень лежат, о болотах, горах, лесах и о дорогах, а длину и ширину их в верстах вносить в ландкарту»* [РГАДА, ф. 248]. А также излагало математическую суть способа «засечек» (применялся в случаях, когда заранее известно взаимное расположение двух точек и необходимо определить по ним положение третьей точки, часто недоступной для измерения) и разъясняющий метод их уравнивания, т.е. ликвидации так называемого «треугольника погрешностей» путем изменения румбов и расстояний.

Для воспитания новых кадров основаны новые учебные заведения и вышли книги, относящиеся к межеванию *«Геометрия словенски землемерие»* (перевод 1708 г.; в 1709 г. вы-

шло ее 2-е издание под заглавием *«Геометрия, приемы циркуля и линейки»* с добавлением «о солнечных часах и превращении фигур», написанное Петром I), *«Геометрия практическая»* (перевод 1709 г.), которые обнаружили заметное влияние на будущие землеизмерительные и межевые дела в России [1]. Межевание осуществлялось геодезистами с составлением на каждую дачу ландкарт. В это время были начаты точные инструментальные съемки для получения карт отдельных территорий и общей «Генеральной» карты государства с определением координат *«астрономических пунктов»*. Межевания, производимые по просьбам частных землевладельцев, совершались также по правилам Писцового Наказа и дополнительных к нему указов XVIII в. Описания обмежеванных земель облекались в форму писцовых межевых книг, лишь иногда дополняемых чертежами для наглядного представления о спорных землях и межах. Основаниями к разрешению споров, как и прежде, служили писцовые книги, старые межи и показания старожилов. В качестве межевщиков служили лица Вотчинной коллегии [2]. В 1718 г. предложено решением Сената *«Межевым делом велеть межевщикам учиться ландмизерии» (геодезии) «велеть им быть у межевых дел непрестанно до смерти и погрешения. А велеть им межевать от живых рубежей, от рек или оврагов, впрямь по феодалиту или по компасу»*. Опубликован Указ, предлагающий *«...которые в Санкт-Петербургской Академии Геодезию и Географию обучили, тех посылать в губернии для сочинения ландкарт»*, передать съемочные и картографические работы в ведение Сената; в 1721 г. вышел Указ Сената все ландкарты *«срисовать в одну меру»* (рис. 4) [3].

Карты и планы составлялись в процессе межевых съемок. Инструментами служили мерные цепи, ленты и тесьма. При съемке местности мерной цепью и кольями использовали два способа: I — разбивкой участка на треугольники или II — на параллельные прямые. Съемка *«треугольниками»* заключалась в том, чтобы на всех важных точках выставлялись колья, и линии их соединяющие образовали треугольники, близкие к правильным. Начиналась съемка с первых двух точек в середине участка, а следующие — определялись расстоянием до

двух других. Каждая точка имела биполярные координаты, стороны треугольников получали промерами цепью. При съемке «параллельными прямыми» пользовались прямоугольными координатами. Такая съемка напоминала копирование рисунка местности, была выгоднее и давала более точные результаты [4].

С помощью глазомерных съемок в кратчайший срок можно было получить полное и достоверное изображение нужного участка местности. Глазомерная съемка не отличалась ни большой точностью, ни изяществом исполнения, но зато обеспечивала быстроту, ясность и наглядность. Большая скорость достигалась, во-первых, применением простейших приемов для измерения линий и углов (с помощью буссоли или компаса), во-вторых, зарисовкой предметов с неодинаковой точностью (объекты, важные для данной цели, вычерчивались очень подробно, второстепенные — прорисовывались несколькими штрихами) [4]. Съемка с применением буссоли производилась следующим образом: выбрав «починный» пункт, лежащий на дороге или меже, измеряли азимут дороги буссолью, и с помощью транспортира наносили направление дороги на лист графленой бумаги, укрепленной на специальной доске. Далее на направлении дороги замечали какой либо объект и направляли на него, измеряя пройденное расстояние шагами. При измерении линии останавливались и обрисовывали рельеф местности. Затем наносили объекты, находящиеся на дороге. Земельный участок разбивался на более мелкие части, что давало возможность делать в каждом из них глазомерную съемку. Подробности вырисовывались на глаз, если дорога отклонялась в сторону, то ее длину до места перегиба откладывали по масштабу шагов, определяли азимут следующего направления и наносили его по транспортиру. Буссоль применяли при межевании как угломерный инструмент для глазомерной съемки местности. Буссолью измеряли магнитные азимуты, а также горизонтальные углы между направлениями на объекты съемки по отсчетам по внешнему лимбу. Для точного измерения направлений и углов в геодезии применялась астролябия, состоявшая из круга с делениями, по которому направления отсчитывали с помощью вращающейся линейки с диоптрами, слу-

жившими для наведения на предмет.

В 1723 г., после того как множество земельных участков в Ингерманландии уже было роздано по особым правилам, но без точного измерения участков, Петр I издал указ о сплошном межевании земель в этом крае с целью привести в точную известность, что и кому дано и что осталось не розданным. В указе повелевалось послать в край генерал-майора А.деКулона с геодезистами из Адмиралтейства для нового измерения и отмежевания уже розданных дач, чтобы «тем всем землям учинить ландкарты, порознь по дачам». Вместе с тем Сенату предписывалось дать посылаемым межевщикам инструкцию и сведения о розданных дачах. Упомянутая в указе инструкция не сохранилась, и мало известно о ходе Кулоновского межевания в Ингерманландии. Однако, судя по сведениям из последующих распоряжений о межевании, можно заключить, что А.деКулон, пробывши в Ингерманландии до 1726 г., «далеко не окончил своего дела и даже вовсе не принес никакой пользы своими работами». «Составив только несколько чертежей, ландкарт и межевых книг на Ингерманландские дачи, он вовсе не представил никакого отчета о своих действиях и тем самым поставил впоследствии правительство в необходимость вновь предпринять межевание Ингерманландии» [1].

После смерти Петра I Ингерманландское межевание прекратилось на долгое время, причем раздача земель под условием их заселения хотя и продолжалась сначала от Юстиц-коллегии, а с 1736 г. от Вотчинной Конторы, но уже без составления ландкарт на дачи. Однако после того как были обнаружены в раздачах земель крупные злоупотребления, и в делах Вотчинной Коллегии не оказалось сведений о том что кому дано и что еще осталось не розданным, Императрица Елизавета Петровна в 1744 г. повелела вновь начать межевание и съемку на план Ингерманландских земель, поручив это дело генерал-майору В.В. Фермору. В руководство В.В. Фермору были даны член Вотчинной Коллегии, нужное количество геодезистов, несколько инструкций, в которых указывалось собрать все сведения и указы по Ингерманландским землям и удостовериться на месте в том, что из дей-



**Рис. 4. План дачи Ингерманландского межевания
Копорский уезд Лапинской мызы 1722 г.
(РГАДА Ф. 1358, оп. 1, ед.хр. Л-7)**

ствий генерал-майора А. деКулона может быть принято, как правильное, и что надлежит переделать. Инструкции предписывали совершать отвод и межевание земель, а также описания к межевым документам на основании правил Писцового наказа 1684 г., но с составлением «ландкарт порознь на каждую дачу». На таких основаниях межевание Ингерманландии продолжалось почти во все царствование Императрицы. Но, по сути, были размежеваны и сняты на план лишь некоторые дачи частных лиц, но без подписей планов владельцами, без оказания на планах меридиана, астролябических и румбических углов и даже измерения линий. Так что впоследствии, уже в середине XIX в., вновь пришлось многое дополнять и переделывать в работах В.В. Фермора, чтобы закончить это первое русское геометрическое межевание, спутанное в самом начале малоопытными исполнителями [1].

К слову говоря, межевые дела того времени свидетельствуют о частых беспорядках на ме-

жах, о жалобах на неправильные и пристрастные действия межевщиков и о продолжительной волоките межевых дел. Полное отсутствие специальных межевых установлений и несоответствие земельного права изменившемуся состоянию поземельных владений были главными тому причинами. Опытные межевщики и писцы, создававшиеся целыми поколениями в межеваниях XVII в., перевелись, а новые — геодезисты были еще немногочисленны и не приспособлены к межеванию. Неудача межеваний была в том, что не умея приспособить устаревшие межевые законы Писцового наказа к новым условиям землевладения, геодезисты ничем не могли улучшить дело даже имея геодезические знания. В земельных отношениях обострилось множество противоречий: неопределенность земельных прав на владения различных сословий; неустроенность земельных наделов служилых людей и податного класса; самовольный захват казенных земель и многочисленность земельных споров; ограничения прав собственности природными объектами и ресурсами; неточность и неоднородность документов на владения.

В 1721 г. стали появляться первые карты губерний, съемки охватили значительную часть территории страны и велись по уездам (до 1744 г.), опирались на определения широт (квадрантом, секстантом) в каждом уездном городе с точностью до 1–10' (по долготе ошибки достигали 6–7°); измерения расстояний (с указанием румбов по астролябии) осуществлялись по большим дорогам мерными цепями. На карты по засечкам или описаниям наносились населенные пункты, дороги, реки, мельницы, каналы, леса, степи, болота и т.д. Наиболее частым масштабом съемки было три версты в дюйме (1:126 000); нередко масштаб карты устанавливали сами геодезисты [3]. Кроме практических результатов это предприятие имело еще и значение обширной геодезической школы для первых русских геодезистов. Целью Правительства на вновь присоединенных землях было постепенное слияние их в одно политическое и экономическое целое с остальной территорией империи, посредством подчинения этих земель общероссийскому законодательству и системе управления. Однако особенности местных условий не всегда спо-

собствовали практическому осуществлению этих подходов. Поэтому политика российского правительства в этой области была в целом гибкой и осторожной. В зависимости от исторических и других условий, для укрепления положения новой власти и доверия землевладельцев, временно оставлялось в неприкосновенности самоуправление тех или иных земель и сохранялись привилегии местного дворянства. Результаты межевания Ингерманландии отражены в Генеральном плане 1749 г.

Появление при Петре I условных владений, то есть существующих только на определенных условиях и для указанных целей, вытекало из стремления к поднятию экономического состояния государства путем привлечения к деятельности общественных сил на пользу государства и под контролем государства. К числу таких реформ следует отнести заселение Ингерманландии и безвозмездная раздача земель, необходимых для развития хозяйства или предприятия. Предпринимателям отводились нужные участки земли не только из земель государственных, но и частных, в большинстве случаев безвозмездно, под условием, что само хозяйство или предприятие (завод, фабрика, мельница и пр.) непременно будет основано. Раздавались также наделы ямщикам, камен-

щикам, плотникам, оружейникам и другим мастеровым людям различных промыслов, переселенным на новые земли [4]. И хотя межевание в разные периоды в Ингерманландской (с 1710 г. — Санкт-Петербургской) губернии было не вполне успешным, в соответствии с предъявляемыми к нему строгими требованиями, Столица и окрестные земли первой губернии Империи были государственно обустроены. Значение реформы по образованию условных владений весьма актуально для проблем освоения и заселения территорий, и для развития современного сельскохозяйственного и промышленного предпринимательства Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман И.Е. История русского межевания. 3-е изд. – М.: Типо-литография В. Рихтер, 1914. – 291 с.
2. Милов Л.В. История России XVIII—XIX веков. – М.: Эксмо, 2006. 784 с.
3. Хренов Л.С. Хронология отечественной геодезии с древнейших времен и до наших дней АН СССР. – Ленинград, 1987. – 291 с.
4. Илюшина Т.В. Кадастр природных ресурсов России. Очерки истории (X – начало XX вв.). – Palmarium academic publishing, 2012. – 315 с.

*Принято к печати 29 февраля 2016 г.
Рекомендовано кафедрой кадастра
и основ земельного права МИИГАиК*

УДК 528.7; 528.711.1

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

ДЕШИФРИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОСТРОВА КУНАШИР ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

©2016 М.Ю. Грищенко, А.Е. Гнеденко

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия
gnedenko.a.e@mail.ru, m.gri@geogr.msu.ru

Аннотация. Космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения достаточно давно используются в различных географических исследованиях. Однако при изучении изменения положения береговой линии преимущественно используются снимки более низкого пространственного разрешения, что связано с ограниченностью архива космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения и необходимостью охватить большие по площади территории. В нашей работе проведено дешифрирование изменения положения береговой линии по разновременным снимкам с учетом влияния приливно-отливных колебаний. Использованы снимки со спутников серии KeyHole и со спутника WorldView-2, а также снимки, полученные в результате аэрофотосъемки. Влияние приливов на отображение положения береговой линии на снимках устранялось посредством введения поправки на отклонение уровня воды от среднего многолетнего. В результате была составлена карта, на которой выделены активно изменяющиеся участки берега. Выявлено, что на изучаемой территории прирост берега составляет около 5 м в год.

Ключевые слова: географическое дешифрирование; космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения; береговая линия; Кунашир; Южные Курилы

REVEALING AND MAPPING THE COASTLINE CHANGES OF THE KUNASHIR ISLAND SOUTHERN COAST USING SATELLITE IMAGERY WITH ULTRA-HIGH SPATIAL RESOLUTION

©2016 Grishchenko M., Gnedenko A.

Lomonosov Moscow State University, Russia
gnedenko.a.e@mail.ru, m.gri@geogr.msu.ru

Abstract. Space images of ultra-high spatial resolution have been used in various geographical studies for a long time. However, due to the limited archives of space images with ultra-high spatial resolution and due to the demand to cover large areas images of lower spatial resolution are mainly used in studies of coastline changes. In the paper authors carry out interpretation of the multitemporal images of the changes of the coastline position taking into account the influence of tidal fluctuations. Images from KeyHole satellites and satellite WorldView-2, as well as the aerial photography have been used. The impact of tides on the displaying position of the coastline on the satellite images has been eliminated by introducing a correction for the deviation of water level from longstanding average one. A map that represents areas of the coast that are actively changing is a result of project described. It has been revealed that emergence of study area is about 5 meters per year.

Keywords: geographical images interpretation, space images of the very high spatial resolution, coastline, Kunashir island, Southern Kurils

Введение. Формирование береговой линии является сложным процессом, отличающимся большим разнообразием в своём проявлении. В каждом конкретном месте этот процесс про-

является по-разному: постепенный намыв пляжа, разрушение берега и снос материала волнами, образование песчаных кос и прибрежных валов. Его развитие определяют такие факто-

ры, как характер течений, преобладающих ветров, наличие источников материала для намыва, характер антропогенной деятельности. Для изучения изменчивости береговой линии используются как полевые данные, так и полученные путём дистанционного зондирования, т.е. аэро- и космические снимки. Применение космических снимков особенно удобно тем, что процессы формирования берегов зачастую охватывают довольно большие по площади территории; кроме того, береговая линия является объектом, хорошо распознающимся практически на любых снимках.

Постановка проблемы. Южная часть острова Кунашир (Южные Курильские острова) выбрана для изучения изменения береговой линии не только из-за плохой изученности острова в целом, но и из-за расположения на этой территории двух крупных аккумулятивных форм — мыса Палтусов (в западной части исследуемой территории) и полуострова Весловский (в восточной части исследуемой территории); последний является крупнейшей аккумулятивной формой на Курильских островах (рис. 1). Формирование этих объектов началось около 2000 лет назад и продолжается в настоящее время.

Формирование полуострова Весловский, по-видимому, связано со следующими процессами. В результате постепенного размыва Головинского клифа, расположенного севернее, в воды Тихого океана поступает большое количество материала, впоследствии аккумулирующегося в южной части полуострова Весловский. Так как Головинский клиф сложен преимущественно рыхлыми песчаными породами, то они увлекаются волнами вглубь моря [1], где впоследствии подхватываются волнами прибрежного течения, направленного на юг. Формирование мыса Палтусов происходит аналогично, за счёт материала, поступающего с охотоморского побережья Кунашира.

Предварительно проведено сравнение данных аэросъёмки 1960-х гг. полуострова Весловского с современными космическими снимками. Видно, что прирост этой формы составляет около нескольких метров в год. Цель настоящей работы – выявить изменчивость береговой линии южной части острова Кунашир и представить результат исследования в карто-



Рис. 1. Положение исследуемой территории относительно окружающих географических объектов

графической форме. Важно установить значение прироста береговой линии за весь исследуемый период и за отдельный год.

Изучение изменения береговой линии часто производится с использованием снимков высокого (десятки метров) пространственного разрешения. Это объясняется не только тем, что они имеют больший пространственный охват и по большей части находятся в открытом доступе, но и большим временным охватом фонда этих снимков. Однако в некоторых случаях их детальности оказывается недостаточно. Использование снимков сверхвысокого пространственного разрешения в нашей работе обусловлено высокими темпами изменения положения берега и необходимостью установить значения прироста аккумулятивных форм. Основной проблемой использования снимков сверхвысокого пространственного разрешения при изучении изменений является малый временной охват данных. Спутниковые снимки сверхвысокого пространственного разрешения стали открыты для широкого круга пользователей относительно недавно — в 1999 г. был запущен американский спутник IKONOS. Ранее снимки сверхвысокого пространственного разрешения использовались практически исключительно в военной отрасли. Впоследствии некоторые из архивов были рассекречены в рамках программ конверсии и стали доступны в качестве материалов для научных исследований [2]. К ним относятся снимки со спутников серии KeyHole, которые и стали основным материалом для дешифри-

рования береговой линии в настоящей работе. Использование конверсионных снимков позволило охватить довольно широкий временной интервал: с 1965 по 2013 г.

Материалы и методы исследования.

Для выявления изменчивости береговой линии в настоящей работе использованы снимки, полученные спутниками серии WorldView-2 (30.06.2013), Key Hole (25.12.1975; 20.12.1968; 30.04.1965; 20.12.1964).

Используемый снимок со спутника WorldView-2 получен методом оптико-электронного сканирования. Пространственное разрешение в панхроматическом канале составляет 0,46 м, в спектральных — 1,84 м [3]. К снимку применена процедура улучшения пространственного разрешения изображений в спектральных каналах путём их слияния с изображением в панхроматическом канале. Снимки со спутников серии KeyHole фотографические. Пространственное разрешение составляет порядка 1–2 м [2].

Распространённым методом дешифрирования береговой линии является визуальное дешифрирование с отрисовкой вручную контура берега. Такой метод отличается простотой, хотя процесс выделения контуров может занимать много времени. В нашей работе использовалось именно визуальное дешифрирование, поскольку оно лучше всего подходит для снимков сверхвысокого пространственного разрешения, которые дают очень детальное изображение, что приводит к возникновению большого количества неверно классифицированных пикселей при автоматизированной обработке. В результате на корректировку изображения, получившегося в результате автоматизированной обработки, может уйти гораздо больше времени, чем на визуальное дешифрирование. Ограничения на применение автоматизированного дешифрирования накладывает и использование фотографических снимков (KeyHole). Особенность всех фотографических материалов — их зернистость, которая возникает из-за использования фотоэмульсии. Помимо этого, у снимков со спутников серии KeyHole имеется только один спектральный канал (панхроматический), и анализировать информацию в ближнем инфракрасном диапазоне, в котором хорошо дешифрируются акватории, возможности нет. Всё это

говорит в пользу более высокой эффективности методов визуального дешифрирования в настоящей работе.

Методика обработки снимков. Первичная обработка снимков включает в себя выделение исследуемой области и привязку снимков. На снимке со спутника WorldView-2 необходимая территория изначально была выделена по заданному при заказе контуру. Из снимков со спутников серии KeyHole исследуемую территорию выделить было необходимо, так как полоса съёмки KeyHole охватывает довольно большую территорию, включающую не только Кунашир, но и прилегающие к нему острова Малой Курильской гряды и Хоккайдо, что приводит к большому объёму файла и его медленной обработке.

Обязательным преобразованием является приведение к общей системе координат и проекции. Системой координат используемого снимка со спутника WorldView-2 является WGS-84, система координат снимков со спутников серии KeyHole неизвестна. Была осуществлена привязка снимков со спутников серии KeyHole к снимку со спутника WorldView-2. Стандартный кадр снимка со спутника KeyHole имеет вытянутую форму, по длине он намного больше, чем по ширине. Плёнка помещалась на барабан и проворачивалась по мере прохождения спутника над снимаемой территорией [2]. В результате искажения в разных частях кадра сильно различаются. Поэтому для этих снимков подходят полиномиальные преобразования, однако, следует учитывать степень полинома. Полиномы высоких порядков (третьей и более степени) не использовались, так как они слишком сильно искажают изображение.

Используемые материалы соответствуют друг другу по уровню пространственного разрешения, покрывают интересующую нас территорию. Временной разброс дат съёмки за период в 48 лет позволяет проследить изменчивость береговой линии за этот период, а наличие снимков с интервалом в один год позволяет оценить её средние значения за год.

Однако на положение береговой линии оказывает влияние приливо-отливная деятельность, так как в зависимости от высоты прилива положение береговой линии на сним-

ке может изменяться в пределах нескольких метров, что может исказить результат дешифрирования береговой линии. В целом уровень прилива для данной территории колеблется в пределах одного метра [4].

Для того, чтобы определить уровень воды на каждом снимке, необходимо знать время съемки для каждого из них. Для снимка со спутника WorldView-2 оно дано в отдельном файле вместе с другими метаданными. Но для снимков со спутников серии KeyHole известен год, месяц и день съёмки, точное время неизвестно. В этом случае время можно определить по косвенным признакам. Определить время съемки в пределах двух-трех часов позволяет положение теней — они довольно короткие и направлены в сторону севера. Из этого можно сделать вывод, что снимки сделаны в околополуденное время.

Информация о приливах находится в открытом доступе на Кунаширском портале [5]. Использовались данные о приливах для пунктов Южно-Курильск и Головинно. По данным об уровне воды можно определить, какие снимки были сделаны во время положения воды на среднем уровне и насколько сильно может быть изменено отображение положения береговой линии на других снимках. Авторам было заранее известно местоположение пологих стабильных (не испытывающих значительных изменений за исследуемый период) участков береговой линии. Была проведена оценка влияния приливно-отливных явлений на изменение отображения положения береговой линии на таких участках. На основе этой оценки введена поправка в положение береговой линии на аккумулятивных участках побережья при их дешифрировании. Величина приливов и отливов на даты съемки сравнительно невелика, максимально возможное значение составляет +20 см. Помимо этого, при проведении береговой линии при высоком уровне прилива как ориентиры использованы прибрежные валы, которые становятся четко различимыми на снимках (так как они образованы песчаными наносами, то при поднятии уровня моря резко выделяются своим светлым цветом на фоне темной воды).

Результаты и их анализ. Итогом работы является карта изменения положения бере-

говой линии южной части острова Кунашир (рис. 2). На представленном фрагменте карты (рис. 3) заметно, что наибольшие изменения происходят на южной оконечности полуострова Весловский (мыс Весло), а также на мысе Палтусов. Характер изменения этих аккумулятивных форм отличается друг от друга, хотя выделяется направление их продвижения вглубь пролива Измены.

Изменения полуострова Весловский носят стабильный характер, четко прослеживается постоянный прирост берега в его южной части. Прирост за год может варьировать на различных участках берега, разброс значений достигает от 3 до 8 м. В среднем в год он составляет 5 м. Всего за период с 1960 по 2013 гг. прирост береговой линии составил около 350 м. Стоит отметить, что, несмотря на быстрое изменение, форма оконечности полуострова в целом сохраняется. Особенно это заметно по характерной «сплюснутой с юга» форме мыса Весло и его небольшому изгибу на юго-запад. Наибольшим изменениям подверглись самая южная часть Весловского, а также прилегающая к нему часть юго-восточного побережья.

Такое постоянство в приросте берега, а также в сохранении очертаний, может объясняться постоянством направления течения на данном участке [6]. Оно имеет направленность с севера на юг и, продвигаясь вдоль тихоокеанского берега Кунашира в этом направлении,

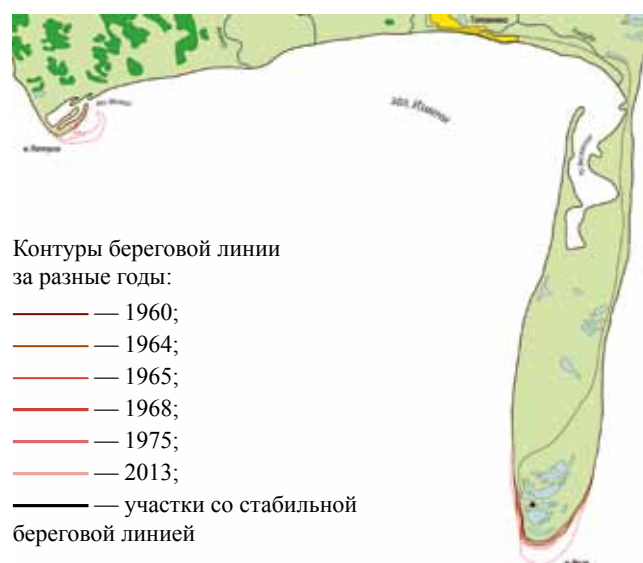


Рис. 2. Изменения береговой линии южной части острова Кунашир за период 1960–2013 гг.

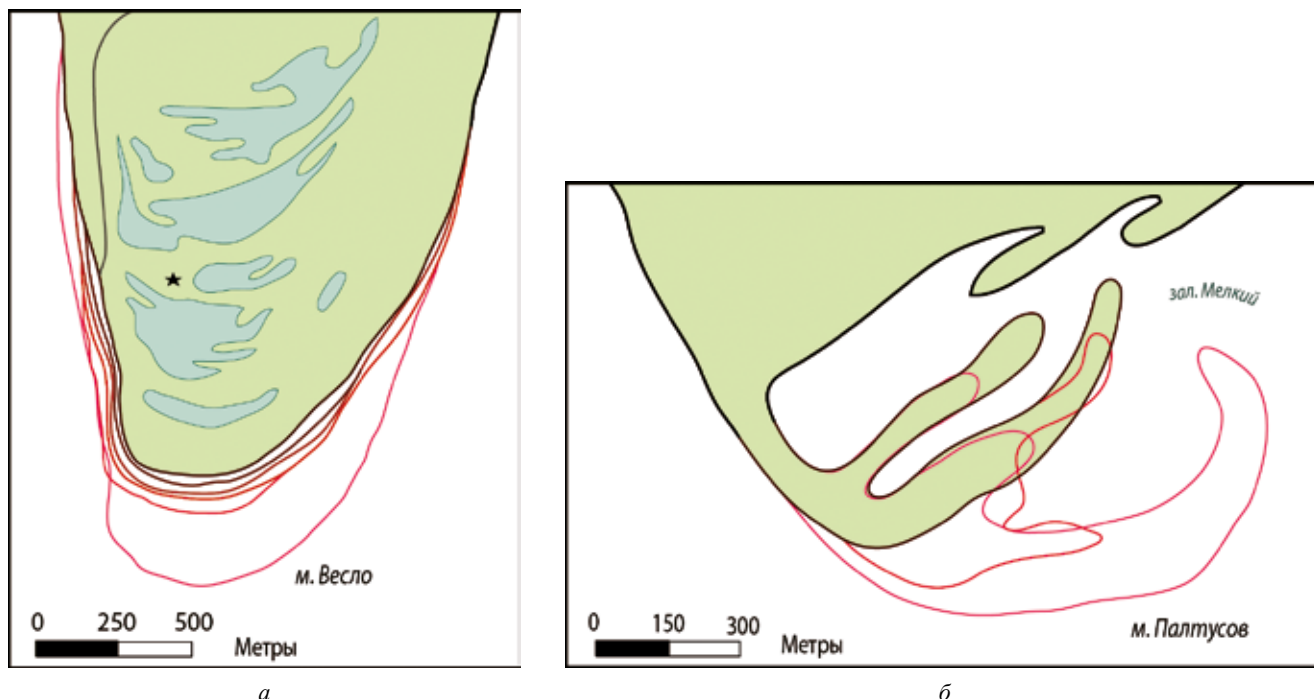


Рис. 3. Изменение береговой линии южной части полуострова Весловский (а) и мыса Палтусов (б)

доходит до крутого поворота береговой линии на запад. Часть от основного течения отходит в сторону открытого водного пространства, в результате чего его скорость замедляется, а влекомые им материалы начинают аккумулироваться на побережье [7].

Помимо течения на формирование полуострова оказывает влияние и морское волнение. Волны могут способствовать перемещению пород, слагающих полуостров Весловский [8]. Мыс Весло сложен самыми молодыми песчаными отложениями, которые легко приводятся в движение прибоем [6]. С учетом сильного зимнего прибоя и западной и юго-западной направленностью ветра [4] можно предположить, что волнение моря также участвует в формировании полуострова, хотя и не в такой большой степени, как прибрежное течение.

В северной части полуострова Весловский сохранились следы ранних этапов образования этой аккумулятивной формы. Они выражены в виде чередующихся вытянутых валов и западин, заполненных водой. Заметна разница между ландшафтом, характерным для южной части Кунашира, и территории, прилегающей к Весловскому, — граница аккумулятивной формы заметна по изменению характера рельефа: он становится очень пологим, появляются серии невысоких вытянутых положительных

форм рельефа, ориентированных с востока на запад; долины эрозионных форм обрываются, выходя к плоскому участку.

Другой участок берега, подвергшийся значительным изменениям за исследуемый период — мыс Палтусов (см. рис. 3, б). На карте видно, что изменения за разные годы значительно отличаются друг от друга, но в целом можно отметить выраженную тенденцию к приросту берега. Сам мыс имеет довольно сложную форму, это три чередующихся песчаные косы, имеющих общее основание и направленность юго-запад — северо-восток. Можно заметить, что прирост третьей косы начался в период между 1968 и 1975 гг., поскольку в 1968 г. и до него изменения не обнаружены. На снимке 1975 г. заметно, что на оконечности мыса развивается аккумулятивная форма, но по размеру она не превышает две предыдущих. В 2013 г. она существенно больше в размере, имеет выраженную закругленную форму, загибается в сторону побережья. Вероятно, две косы, которые находятся севернее неё, образовались в разное время, самая дальняя, соответственно, самая старшая. При этом заметно, что в целом они повторяют форму друг друга, что может говорить о постоянстве направленности прибрежного течения, формирующего их.

Выводы.

1. Наиболее активно изменяющимися аккумулятивными формами в южной части острова Кунашир являются мыс Палтусов и полуостров Весловский. В наибольшей степени прирост берега направлен вглубь пролива Измены, при этом особенно сильно это происходит в южной части полуострова Весловский (мыс Весло). Значения прироста берега в год здесь составляют порядка 5 м, а за весь исследуемый период в 53 года он составляет 350 м.

2. Определение уровня береговой линии в условиях влияния приливов возможно не только исходя из соотношения уровня моря по таблицам приливов и времени съёмки, но и по косвенным признакам, таким как обнажение прибрежных отмелей, полосы осушки вдоль берега. Особенно хорошо заметны колебания уровня моря на стабильных (не подверженных выраженным изменениям) пологих участках береговой линии, таких как песчаные пляжи на побережье лагунных озёр.

3. Форма и направленность развития аккумулятивных форм может служить источником информации о характере наиболее стабильных прибрежных течений, поскольку именно они служат переносчиками аккумулялирующих материалов.

Авторы выражают благодарность за предоставленные материалы сотрудникам Института

морской геологии и геофизики ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск): заведующему лабораторией вулканологии и вулканопасности А.В. Рыбину и заведующему лабораторией цунами Г.В. Шевченко; за ценные советы при обсуждении работы — доценту кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова А.И. Прасоловой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Государственный природный заповедник Курильский* [Электронный ресурс]// <http://kurilskiy.ru/>. Дата обращения: 08.01.2016.
2. *Time mislead* [Электронный ресурс]. URL: <http://timemislead.com/kosmonavtika/> Дата обращения: 17.11.15.
3. Спутники QuickBird, WorldView-1, WorldView-2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.WorldView.ru>. Дата обращения: 25.11.15.
4. *Лоция Охотского моря*. Книга №1406. Выпуск 1. Южная часть моря. М.: ГУНиО МО, 1984. – 57 с.
5. *Кунаширский портал* [Электронный ресурс]. URL: <http://esimo.oceanography.ru>. Дата обращения: 19.12.15.
6. *Зенкович В.П.* Морской берег. М.: Гос. изд-во технико-географической литературы, 1952.
7. *Tribe H.M.* The geomorphology of Farewell Spit and its sensitivity to sea-level rise: Masters of Science (Hons) in Physical Geography, University of Wellington, 2008.
8. *Tiepolt L., Schumacher W.* Historische bis rezente Küstenveränderungen Raum Fischland-Darß-Zingst-Hiddensee anhand von Karten, Luft- und Satellitenbildern // *Die Küste*, 1999, No. 61, S. 29–54.

*Принята к печати 22 марта 2016 г.
Рекомендована кафедрой картографии
и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова*

УДК 550.837.82; 528

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2016 И.А. Миртова¹, Д.В. Швецов²

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

²ООО «Научно-производственная фирма «ТАЛКА-ГЕО»», Москва, Россия

Mirtova.ira@yandex.ru

Аннотация. Создание глубоких карьеров и обширных отвалов при открытой добыче каменного угля приводит к нарушению природного и созданию антропогенного ландшафта. Кроме этого, возрастает риск появления развития опасных экзогенных процессов, к которым относятся: оползни – потоки, оползни – блоки, оползни – обвалы, осыпи и оплывины. Эти процессы провоцируют сползание тяжелых масс горных пород, способных повредить или засыпать грунтом прочные сооружения и технику в карьерах. Опасные экзогенные процессы отличаются высокой динамичностью, поэтому целесообразным является организация локального аэрокосмического мониторинга. Приводятся результаты анализа динамики опасных экзогенных процессов на территории Восточно-Бейского угольного разреза по разновременным аэро- и космическим снимкам.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, аэрокосмический мониторинг, опасные экзогенные процессы

USING REMOTE SENSING METHODS TO MONITOR HAZARDOUS EXOGENOUS PROCESSES

© 2016 Mirtova I.¹, Shvetsov D.²

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

²Scientific And Production Firm «TALKA-GEO» (limited liability company), Moscow, Russia

Mirtova.ira@yandex.ru

Abstract. Making deep pits and dumps with large open pit coal leads to disruption of natural landscape and creates man-made landscape. In addition, the risk of dangerous exogenous processes increases. They are landslides - flows, landslides - blocks, slides - avalanches, debris and mud flows. These processes make heavy masses of rock slide. They can damage or fill strong facilities and equipment in the quarries with soil. Hazardous exogenous processes are highly dynamic. Therefore, it is appropriate to organize the local aerospace monitoring. The article represents data got after the dangerous exogenous processes dynamics on the territory of the East-Beysky coal mine has been analyzed. Analysis has been carried out using aero and space images taken at different times.

Keywords: remote sensing, aerospace monitoring, hazardous exogenous processes

Каменный уголь — один из самых распространенных энергетических ресурсов России. В зависимости от глубины залегания угольного пласта, его площади, формы и толщины, различных географических и экологических факторов выбирается определенный метод добычи угля. К основным способам относятся: шахтный обычный; подземный гидравлический; карьерный (открытый).

Открытый способ добычи угля считается одним из самых распространенных в мире. Этим способом добывается более 55% угля в год, что составляет 4202,1 млн т [1]. В России открытая добыча угля составляет 2/3 общего объема и базируется в восточных районах страны, главным образом в Кузнецком, Минусинском, Канско-Ачинском, Иркутском и Южно-Якутском угольных бассейнах.

Достоинством данного способа добычи каменного угля является то, что этот метод экономически в 2–2,5 раза эффективнее, чем шахтный способ. Этот способ добычи считается наиболее производительным и дешевым. Однако учитываются и недостатки. Создание глубоких карьеров и обширных отвалов вскрышных пород ведет к нарушению природного и созданию антропогенного ландшафта, что приводит к негативному воздействию на окружающую среду. В результате негативных последствий возрастает риск появления и развития опасных экзогенных процессов на территории угольных месторождений, а также возникновения чрезвычайных ситуаций.

К опасным экзогенным процессам относятся: оползни–потоки, оползни–блоки, оползни–обвалы, которые приводят к сползанию тяжелых масс горных пород, способных повредить и раздавить прочные сооружения, засыпать их грунтом, преградив доступ к ним. Кроме этого образуются осыпи (лотковые и площадные), оплывины (в условиях обводненности карьеров), которые приводят к обрушению уступов и бортов карьеров [2].

Одним из современных направлений мониторинга опасных экзогенных процессов и смещений земной поверхности является радиолокационный космический мониторинг. Технология мониторинга смещений земной поверхности и мониторинга деформаций сооружений, будучи интегрированной в систему инженерно-маркшейдерских наблюдений, позволяет проводить наблюдения деформаций и смещения с высокой точностью. Основное преимущество данного метода — это независимая дистанционная оценка изменений по всей площади снимка. Для расчёта используются массив спутниковых данных, которые получают с космических аппаратов с определенной периодичностью [3].

На открытых угольных месторождениях еще с 80-х годов XX в. были начаты работы по применению аэрофотосъемки для выявления опасных процессов, их динамики и деформационных смещений на отвалах и откосах угольных разрезов. Аэрофотографический (аэрофотограмметрический) мониторинг — надежный, и на сегодняшний день актуальный метод [4].

Этапы современного аэрофотографического мониторинга [5]:

проведение фотографических измерительных работ, включающих собственно аэрофотосъемку и позиционирование опорных точек;

создание и обновление цифровых моделей объектов с помощью аналитической цифровой аппаратуры;

визуализация цифровой информации.

Аэрофотосъемка угольного месторождения производится в настоящее время в том числе с беспилотных летательных аппаратов или пилотируемых самолетов. Автоматизированная обработка цифровых моделей угольных разрезов, применяемая в аэрофотографическом мониторинге, позволяет значительно увеличить информативность мониторинга на угольных разрезах.

Для выявления динамики опасных быстро развивающихся экзогенных геологических процессов в угольной промышленности целесообразен локальный мониторинг, достоинством которого является многообразие методов исследования и автоматизированная обработка данных дистанционного зондирования.

Авторы исследовали возможность анализа динамики опасных экзогенных процессов на территории Восточно-Бейского разреза по разновременным аэро- и космическим снимкам. Территория объекта исследования расположена в Бейском районе Республики Хакасия. Разрез расположен в 10 км к западу от поселка Кирба и в 40 км южнее города Абакан. Восточно-Бейский разрез относительно других участков угольных месторождений Минусинского бассейна — недавно развивающийся [6].

Первые планы по добыче и мероприятия по подготовке месторождения появились здесь в 1987 г. Строительство угольного разреза Восточно-Бейский было начато в 1991 г. В 1993 г. был вскрыт угольный пласт, и началась добыча угля. С 1993 по 2000 гг. объем добычи угля возрос с 50 тыс. до 912 тыс. т в год.

На исследуемом месторождении добыча угля также сопровождается опасными процессами, вследствие которых могут возникнуть чрезвычайные ситуации и катастрофы. Среди наиболее часто встречающихся на разрезе процессов антропогенного характера — осыпи на бортах и уступах карьера. При каждой

разработке новых участков месторождения на крайних бортах ежемесячно опадает песчаная масса в виде мелких частиц осыпных и вскрышных пород, в данном случае выскохшего чернозема и суглинистых почв. Площади осыпи в плане составляют от 18 до 27,7 м² на бортах и откосах длиной 40–45 метров и высотой 15–21 м. Площади осыпей на крайних бортах карьера суммарно составляют до 90 км² на Чалпанском участке карьера, и до 170 м² на восточном участке, где борты длиной от 70 до 120 м достигают высоты 23 м.

Также на бортах и уступах горных пород случаются обвалы отколов глыб каменного угля (обвалы горных пород). Случаются обвалы ввиду того, что каменный уголь – твердая порода с удельной плотностью 1–1,3 т/м³. Учитывая это наименее вероятен риск оседания данной горной породы в виде осыпи и мелких частиц и наиболее вероятен риск обвалов, которые встречаются в районе с периодичностью 1–2 раза за летний период.

В северной части карьера, где расположены отвалы вскрышных пород более ранней стадии разработки либо рекультивированные участки, особой динамичностью отличаются оползневые процессы природного характера, активизирующиеся после выпадения осадков, которые наиболее часты в летний период с конца июля по конец августа.

Опасные процессы в данном районе отличаются высокой динамичностью и нуждаются в локальном мониторинге и исследовании по разновременным снимкам для оценки состояния и выяснения скорости протекания этих процессов.

Для исследования были использованы аэрофотоснимки, полученные с беспилотного летательного аппарата GeoScan-101 (БПЛА Geoscan-101) и космические снимки с интернет ресурса Google-Earth и Virtual Earth.

Для создания ортофотоплана на территорию Восточно-Бейского разреза была произведена плановая аэрофотосъемка территории с беспилотного летательного аппарата Geoscan-101 компанией «ООО Талка-Гео» в мае 2014 г. Также была произведена фотограмметрическая обработка полученного материала с помощью программного комплекса PhotoScanPro (Компания Agisoft) [6].

В результате аэрофотосъемки получены снимки с пространственным разрешением 0,15 м/пиксель и продольным и поперечным перекрытиями в диапазоне 67 — 72%. Космические снимки были выбраны за апрель 2013 г. с интернет ресурса Google Earth и из ресурса Virtual Earth за сентябрь 2013 г.

В ходе экспериментальных исследований были использованы следующие программные продукты:

SAS Planet — навигационная программа, включающая в себя возможность загрузки и просмотра карт, спутниковых снимков большого количества картографических онлайн-сервисов;

Global mapper 13 — универсальная программа, позволяющая просматривать, конвертировать, преобразовывать и редактировать различные карты и векторные наборы данных;

«ГИС Панорама» версия 11.4 — универсальная геоинформационная система (ГИС).

Исследование изменений опасных экзогенных процессов проводилось методом сопоставления дешифровочных признаков объектов по разновременным снимкам. Основные этапы автоматизированного дешифрирования снимков следующие:

в программе «SAS Planet 120808» для импорта космических снимков на выбранный район в качестве источника были использованы космические снимки из ресурса Google спутник и Virtual earth;

далее, используя опцию «Выделение прямоугольной областью», был отмечен район разреза;

после этого импортируется фрагмент снимка. Для этого в окне «Операции с выделенной областью» выбирается раздел «Склеить», устанавливается необходимый масштаб, в нашем случае z15, указывается тип карты (Google спутник и Virtual Earth). Для удобства загрузки фрагмента в программу Global Mapper 13, сохраняется фрагмент карты в формате ESW (Enhanced Compression Wavelet), а также в форматах tab и png с прозрачностью и загружается с сохранением данных в рабочей папке;

далее в программе Global Mapper 13 открываются готовые файлы формата ESW, так как необходимо привести ортофотоплан и снимки в единый масштаб и систему координат. Для

этого выбирается проекция Меркатора, приваивается система координат WGS-84. В качестве привязки снимков использовалось местная система координат Восточно-Бейского разреза. Также была осуществлена коррекция снимков, в результате которой было установлено постоянное пространственное разрешение 0,35 м/пиксель. Затем осуществляется привязка космических снимков, для этого каталог опорных точек, которые были спроектированы при аэрофотосъемке карьера, привязываются к полученным фрагментам космических снимков (файл «КАТЭК-В-Б. prj»). Далее экспортируются файлы в формат «prj» и «jpg». На выходе получают привязанные файлы и картинку формата jpg для импорта в «ГИС Панорама»;

на следующем этапе открываются файлы в «ГИС Панорама» и загружаются в качестве растровых данных. На выходе получают растровые данные космических снимков формата RSW;

затем выполняется дешифрирование объектов антропогенного рельефа (отвалы, уступы и откосы бортов карьеров) отдельно на ортофотоплане и космических снимках с использованием классификатора «map 2000», для более детального изучения опасных склоновых процессов.

В результате исследования были зафиксированы пять участков (рис. 1), на которых возникли и развиваются опасные экзогенные процессы. По результатам дешифрирования были составлены схемы их развития.

Фрагменты космического снимка и ортофотоплана (рис. 2) иллюстрируют возникновение эрозионного процесса на участке откоса борта карьера. На ортофотоплане также можно заметить участок образования конуса выноса в результате действия эрозионных процессов на склоне и образование подтопления на дне карьера. На космическом снимке этих объектов не наблюдается.

В результате граница бровки борта карьера смещена (рис. 3). Старая граница бровки показана светло-голубой линией, синей линией обозначена новая граница бровки, смещение — площадью розового цвета. Конус выноса обозначен синими штриховыми линиями, эрозия — белой линией. Данные явления развивались в течение семи месяцев.



Рис. 1. Участки, на которых зафиксированы опасные экзогенные процессы в Восточно-Бейском разрезе

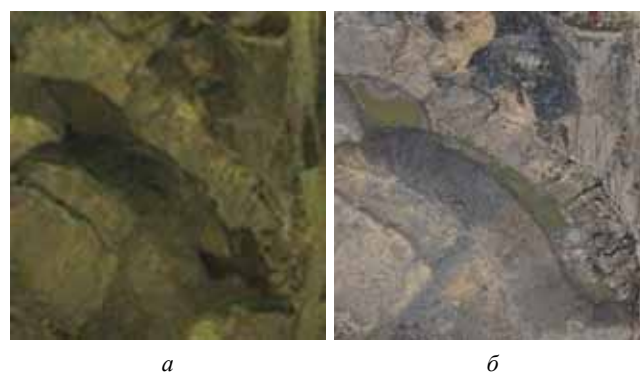


Рис. 2. Склон борта в карьере на участке 1:
а — космический снимок Virtual Earth (сентябрь 2013 г.);
б — фрагмент ортофотоплана (май 2014 г.)

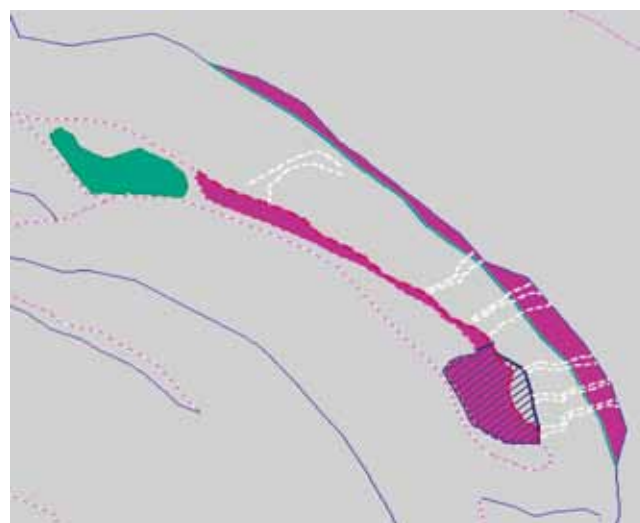


Рис. 3. Схема развития эрозии на участке 1

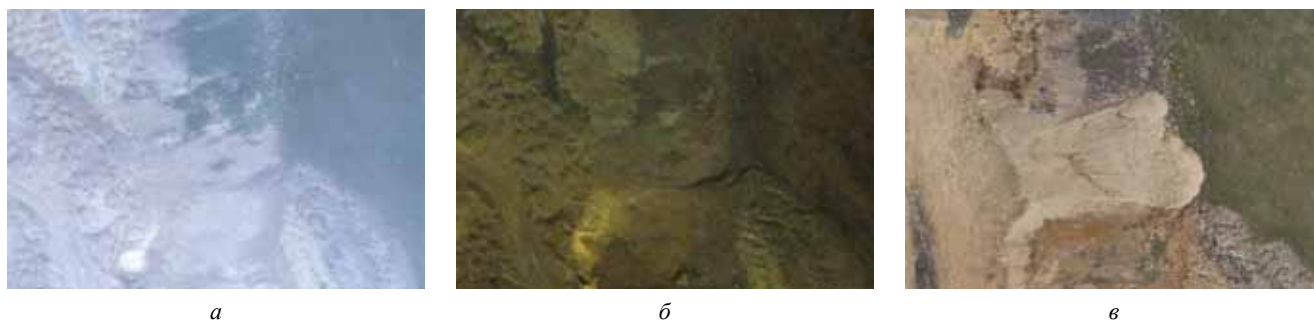


Рис. 4. Склоны отвалов карьера на участке 2:

a — космический снимок Google Earth; *б* — космический снимок Virtual Earth; *в* — фрагмент ортофотоплана



Рис. 5. Схема развития осыпи на участке 2

Фрагменты ортофотоплана и космических снимков (рис. 4) иллюстрируют возникновение осыпного процесса вскрышных пород на отвалах при расширении карьера на участке 2.

При сопоставлении контуров были замечены смещения бровки борта карьера, площадь смещения обозначена розовым цветом (рис. 5).

Смещения границ бровки были выявлены по результатам дешифрирования ортофотоплана и космического снимка Virtual Earth. Старая граница показана на схеме красной пунктирной линией. Смещений при сопоставлении дешифрирования космических снимков Google



Рис. 6. Склон отвала карьера на участке 3:

a — космический снимок Google Earth; *б* — космический снимок Virtual Earth; *в* — фрагмент ортофотоплана

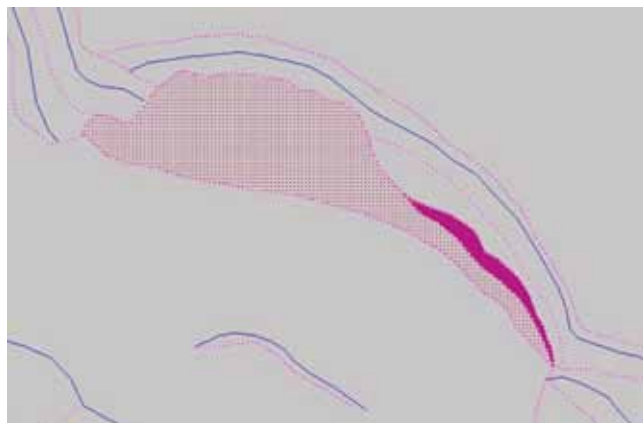


Рис. 7. Схема развития осыпи на участке 3

earth и Virtual Earth не обнаружено. Это позволяет сделать вывод о том, что данный опасный экзогенный процесс развивался в период с сентября 2013 г. по май 2014 г.

Фрагменты ортофотоплана и космических снимков (рис. 6) иллюстрируют развитие осыпного процесса вскрышных пород на отвалах при расширении карьера на участке 3.

При сопоставлении контуров были замечены смещения бровки борта карьера, площадь смещения обозначена светло-розовым цветом за период с апреля по сентябрь 2013 г., и розовым — в период с сентября 2013 г. по май 2014 г. (рис. 7).



a

б

в

Рис. 8. Склон отвала карьера на участке 4:

a — космический снимок Google Earth; *б* — космический снимок Virtual Earth; *в* — фрагмент ортофотоплана

Смещения границ бровки были замечены по результатам дешифрирования ортофотоплана и космических снимков Virtual Earth и Google Earth. Площадь смещений при сопоставлении дешифрирования космических снимков Google Earth и Virtual Earth больше, чем площадь смещений при сопоставлении космического снимка Virtual Earth и ортофотоплана. Это позволяет сделать вывод о том, что данный опасный экзогенный процесс активнее развивался в период с мая по сентябрь 2013 г.

Фрагменты ортофотоплана и космических снимков (рис. 8) иллюстрируют развитие осыпного процесса вскрышных пород на отвалах при расширении карьера на участке 4. При сопоставлении контуров были заметны различия контуров бровки откоса борта карьера, площадь смещения обозначена точечной заливкой за период с апреля по сентябрь 2013 г., и розовой — в период с сентября 2013 г по май 2014 г. Граница бровки на апрель 2013 г. показана красной пунктирной линией, за сентябрь 2013 г. — красной сплошной линией (рис. 9). Смещения границ бровки были замечены по результатам дешифрирования ортофотоплана и космических снимков Virtual Earth и Google Earth. Площадь смещений при сопоставлении дешифрирования космических снимков Google Earth и Virtual Earth меньше, чем площадь смещений при сопоставлении космического снимка Virtual Earth и ортофотоплана. Это позволяет сделать вывод о том, что данный опасный экзогенный процесс активнее развивался в период с сентября 2013 г. по май 2014 г.

По результатам исследования было выявлено, что в период с апреля 2013 г. по май 2014 г., наиболее часто встречающиеся опасные экзогенные процессы — осыпные процес-

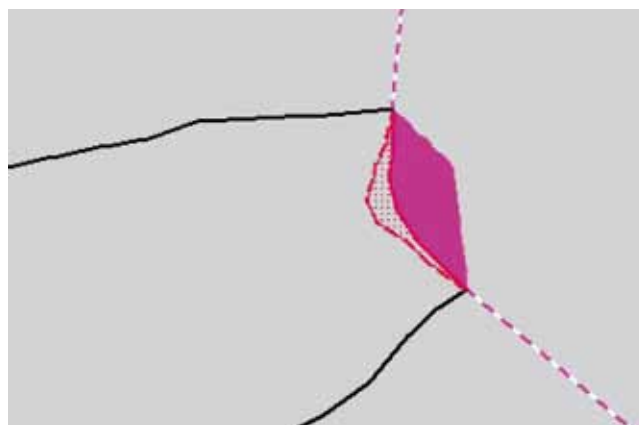


Рис. 9. Схема развития осыпи на участке 4

сы вскрышных пород на откосах бортов карьеров, которые активно развиваются.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №16-05-00615.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Городниченко В.И., Дмитриев А.П.* Основы горного дела. М: Изд-во «Горная книга», 2008. — 510 с.
2. *Осипов В.И.* Опасные экзогенные процессы. — М: ГЕОС, 1999. — 290 с.
3. *Горбунов В.А.* Радиолокационный космический мониторинг деформаций территории в районе Гайского ГОК // Геопрофи. — 2013. — №5. — С. 50–54.
4. *Оптимальные требования к аэрокосмической информации, необходимой для мониторинга экзогенных геологических процессов в зонах интенсивного освоения.* — М: ВСЕГИНГЕО, 1997. — 50 с.
5. *Клейменов Р.Г., Гуцал М.В.* Аэрофотографический мониторинг деформационных процессов на гидроотвалах угольных разрезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2009. — №4. — С. 3–7.
6. *Маслялко В.Я.* Применение 3D-технологий при оперативном планировании и проектировании открытых горных работ / Материалы XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: 2014. — С. 37–47.

Принята к печати 9 февраля 2016 г.

Рекомендована кафедрой космического мониторинга и экологии МИИГАиК

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗАГРОСА, ЗАПАДНЫЙ ИРАН)

©2016 М.М. Каркон варносфадерани¹, Р.С. Харазми², Д.А. Шаповалов¹, Е.М. Митрофанов³

¹Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

³Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

mansoor_karkon@yahoo.com, seferok@mail.ru,

kharazmiRasoul@Gmail.com, shapoval_ecology@mail.ru

Аннотация. Представлен алгоритм тематической обработки космических снимков с целью повышения точности визуального дешифрирования (ВД) на основе применения вегетационных индексов (ВИ). Полученные авторами результаты показали, что самую точную корреляционную взаимосвязь с общей биомассой растительности имеет ВИ *GEMI* (Global Environmental Monitoring Index). В результате стало возможно применение снимков более высокого разрешения с портала Google Earth, которые позволяют проводить визуальное дешифрирование растительного покрова с высокой точностью. Это дает возможность использовать данный метод для мониторинга растительного покрова.

Ключевые слова: растительный покров, вегетационные индексы, Индекс глобального мониторинга окружающей среды, визуальное дешифрирование, Загрос

ACCURACY RANKING OF PLANT COVER VISUAL PHOTO INTERPRETATION BASED ON VEGETATION INDICES (THE ZAGROS MOUNTAINS, WEST IRAN ARE TAKEN AS AN EXAMPLE)

©2016 Mansour Karkon varnosfaderani¹, Kharazmi R.², Shapovalov D.¹, Mitrofanov E.³

¹Moscow State University of Land Management, Russia

²Saint-Petersburg State University, Russia

³Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

mansoor_karkon@yahoo.com, seferok@mail.ru,

kharazmiRasoul@Gmail.com, shapoval_ecology@mail.ru

Abstract. The article describes the algorithm of thematic processing of space images with the aim to increase the accuracy of visual interpretation (VD) via the use of vegetation indices (VI). Obtained by the authors results, have shown that the most accurate correlation with the total biomass of vegetation has *V GEMI* (Global Environmental Monitoring Index). As a result, it has become possible to use images of higher resolution with Google Earth, which allow interpreting vegetation visually online and with a high degree of accuracy. This gives you an opportunity to use this method for vegetation monitoring.

Keywords: Plant cover, vegetation Index, Global Environmental Monitoring Index (*GEMI*), visual interpretation, Zagros

Изучение изменений природных комплексов и степени антропогенного воздействия на окружающую среду, как одна из задач экологического мониторинга, связано с построением карт природной среды [1, 2]. Среди компонентов природной среды важное место занимают леса. Для территории Ирана, где преобладает полупустынный климат, приоритетное значение имеет растительный покров. В частности, лесные массивы имеют важное значение с точки зрения их водо-, ресурсо- и средообразующих функций [1, 2].

В настоящее время картографирование, в том числе и растительного покрова, все чаще опирается на дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Снимки обрабатываются при помощи разнообразного программного обеспечения, при этом возможны варианты дешифрирования являются автоматизированное или визуальное. Автоматизированное дешифрирование опирается на алгебру растровых изображений в различных спектральных каналах. Их результатом являются различные спектральные индексы,

среди которых наиболее известны вегетационные [3, 4]. Для дистанционного мониторинга нужно дополнительно изучить возможность использования различных вегетационных индексов для более точного разделения по снимкам высохшей и зеленой растительности [5, 6].

Исследование растительного покрова с использованием данных ДЗЗ проводилось нами для горной территории Загроса, расположенной на западе Ирана в провинции Лорестан (рис. 1). Экосистемы данного региона изменены под воздействием деятельности человека. Так, за 2002–2013 гг. площадь леса сократилась здесь на 16,9%. Основными факторами антропогенной трансформации растительного покрова на данной территории являются рекреация, чрезмерный выпас скота и загрязнение воздуха выбросами промышленных предприятий. В этой связи анализ современного состояния растительного покрова представляет несомненный теоретический и практический интерес [7].

Для составления карты растительного покрова использовались многозональные данные со спутника Landsat, имеющиеся в свободном доступе, разрешение составляет 30 м. Для их

обработки использовался комплекс ScanEx Image Processor. С его помощью были рассчитаны вегетационные индексы (ВИ).

Для оценки точности полученных результатов нами были проведены также полевые исследования. В 2007–2009 гг. была заложена трансекта, на которой с использованием GPS была реализована сеть опорных пунктов, соответствующая ячейкам Универсальной поперечной проекции Меркатора (UTM), где расстояния между линиями сетки составляло 1 км. На экспериментальных площадках проводился расчет плотности древостоев. Отправная точка каждого разреза была расположена в точке пересечения линии сетки 1×1 км на карте масштаба 1:250 000 в местах с лесным покровом.

В результате стало возможным выбрать вегетационный индекс, наиболее точно отражающий плотность древостоя. Как показал анализ, в наибольшей степени для этих целей подходит Global Environmental Monitoring Index (*GEMI*), который дает самую точную корреляционную взаимосвязь с общей биомассой в этом регионе (таблица). Коэффициент корреляции этого индекса с запасами биомассы и плотностью древостоя составляет 0,97 [1, 2].

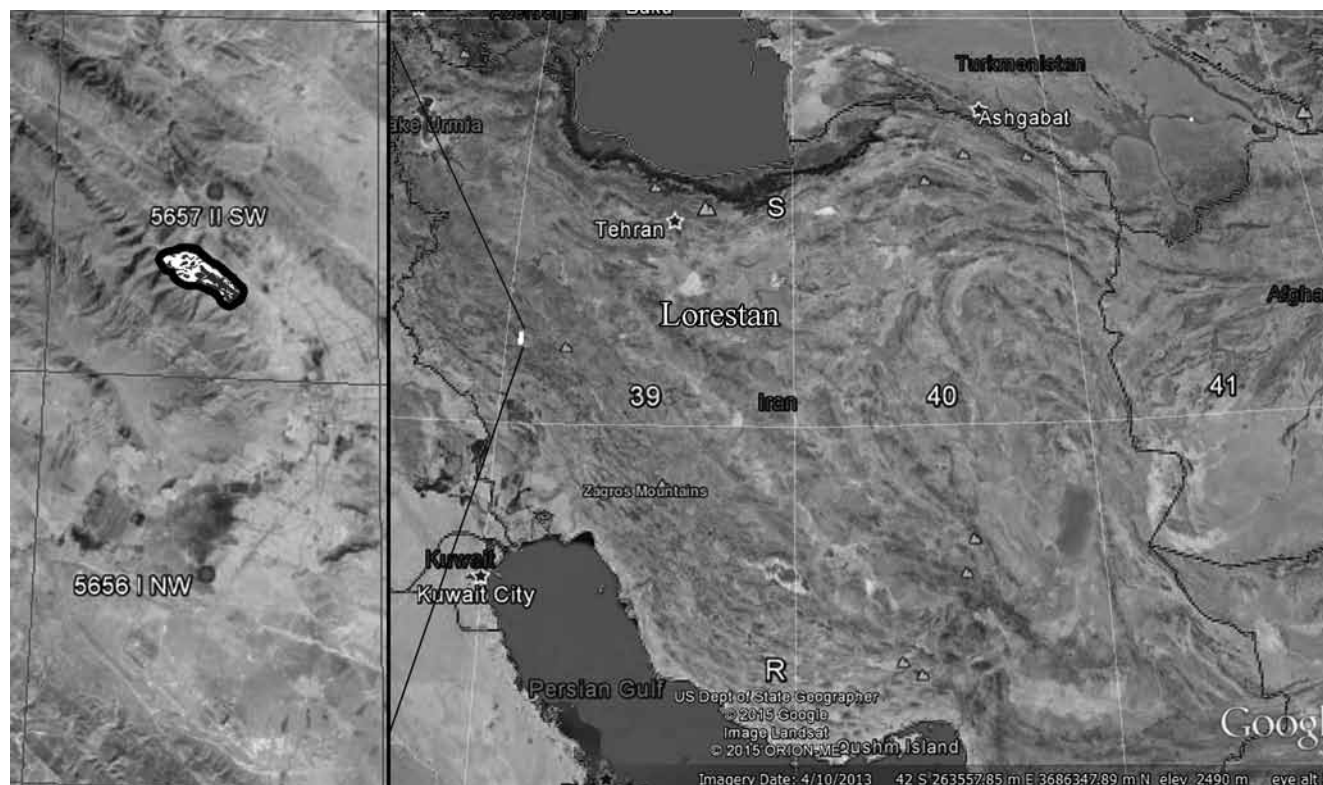


Рис. 1. Схема расположения изучаемого региона (провинция Лористан, западный Иран)

Результатирующие значения коэффициентов детерминации, корреляции, *RMSe* и регрессионные уравнения для изученных вегетационных индексов

Коэффициент			Регрессионные уравнения	ВИ	Описание
Корреляции	<i>RMSe</i>	Детерминации (R^2)			
0,92	0,28	0,85	$Y=378,21X-196,672$	<i>EVI</i>	X — значение ВИ
0,97	0,02	0,94	$Y=316,28X-94,991$	<i>GEMI</i>	Y — проценты плотности
0,94	0,04	0,88	$Y=643,57X-339,03$	<i>IPVi</i>	
0,90	0,05	0,81	$Y=536,76X-22,029$	<i>MSAVI2</i>	
0,94	0,04	0,88	$Y=318,76X-16,858$	<i>NDVI</i>	
0,92	0,043	0,84	$Y=546,11X-23,558$	<i>SAVI (L=0,5)</i>	
0,9	0,4	0,81	$Y=486,3X-22,401$	<i>SAVI (L=1)</i>	



Рис. 2. Границы участков без лесной растительности в пределах тестового участка в программе Google Earth

Для повышения точности результатов дешифрирования был выбран тестовый участок, для которого использовались снимки более высокого разрешения (Google Earth) (рис. 2). Поскольку исследования плотности леса были проведены в 2009 г., то и вегетационные индексы было решено рассчитывать также на этот год. Соответственно, изображение для визуального дешифрирования более высокого пространственного разрешения необходимо подобрать

максимально близким к 2009 г. В программе Google Earth были отрисованы участки без растительности (рис. 3). Полученные полигоны, после конвертации в формат *Shp, в пакете Arc Map с помощью инструмента Merge были объединены и рассчитана их общая площадь, которая составила 574.267 га.

По полученным векторным слоям с помощью программы ArcMap была построена тематическая карта, отражающая наличие лесной растительности, а с помощью ПО ScanEx Image Processor и уравнении регрессии (см. табл.) была составлена тематическая карта, отражающая пространственное распределение ВИ *GEMI* (см. рис. 3).

Сопоставление данных, полученных на основе вегетационного индекса, и данных, полученных в результате визуального дешифрирования, показывает, что данный метод обеспечивает высокую точность (коэффициент корреляции составляет 0,97). Следует отметить, что точность работы зависит от аккурат-

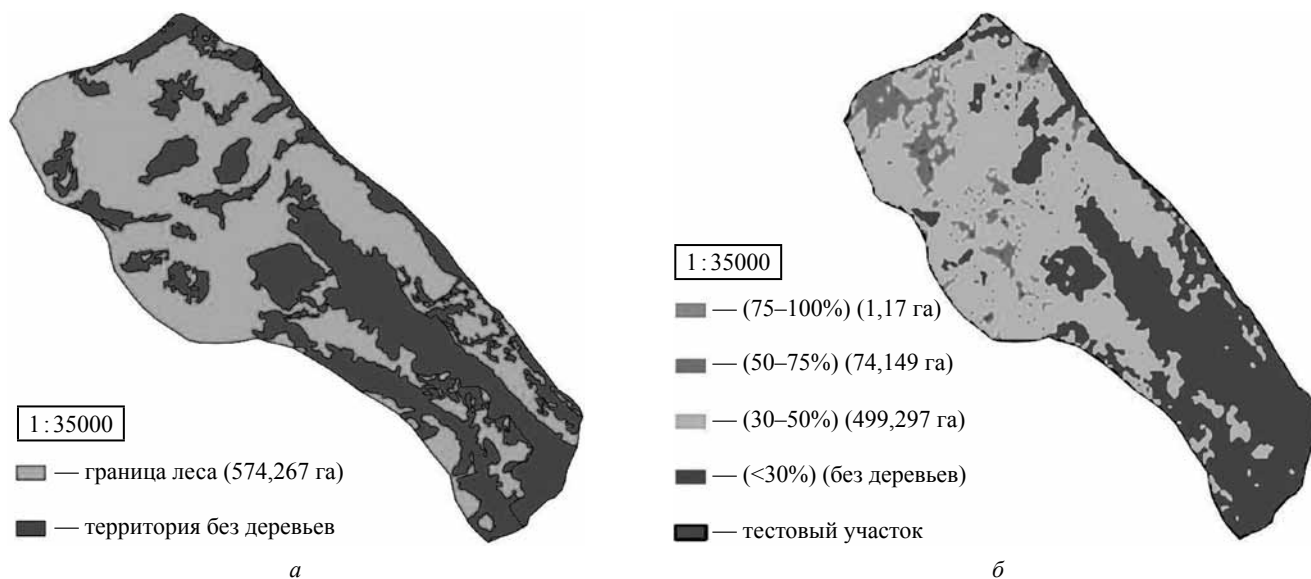


Рис. 3. Тематическая карта лесной растительности по данным Google Earth (а) и *GEMI* (б)

ности исследователя во время выделения объектов в Google Earth. Данный метод возможно применить в других аналогичных регионах, поскольку он позволяет быстро, достаточно достоверно и с минимальными затратами провести картографирование отдельных характеристик растительного покрова территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каркон варносфадерани М.М., Лубнин Д.С., Гаврилова В.В., Митрофанов Е.М. // Выбор и аналитическое обоснование оптимального вегетационного индекса полусухих территорий на примере территории западного Ирана с использованием современных ГИС-технологий / Сб. статей «Экология Экономика Информатика». Том 3 - Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. – 2015. – С. 241–249.

2. Братков В.В., Овдиенко Н.И. Геоэкология: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 272 с.

3. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика, 2011. – №2. – С.98–102.

4. Николаевич Д. Использование данных дистанционного зондирования земли при исследовании многолетней динамики лесных экосистем // Геология, география и глобальная энергия. – 2012. – № 4 (47).

5. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика, 2011. – №2. – С.98–102.

6. Шуваев Н.С., Бармин А.Н., Колчин Е.А. Использование материалов дистанционного зондирования Земли и географических информационных систем при исследовании русловых деформаций // Геология, география и глобальная энергия. – 2010. – № 4. – С. 119–122.

7. Харазми Р.С., Чабан Л.Н. Анализ динамики экосистем бассейна Систан по результатам автоматизированной обработки космических мультиспектральных снимков // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – № 4. – С.94–100.

Принята к печати 17 марта 2016 г.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ СМЕРЧЕВЫХ ВЕТРОВАЛОВ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ LANDSAT И ТЕМАТИЧЕСКИМ ПРОДУКТАМ ИХ ОБРАБОТКИ

©2016 Р.К. Абдуллин, А.Н. Шихов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия
gis@psu.ru

Аннотация. Описана методика идентификации случаев возникновения смерчей в лесной зоне на основе данных о вызванных ими ветровальных нарушениях лесного покрова. Ретроспективный анализ ветровалов выполнен по многолетнему ряду данных космической съемки LANDSAT и полученных на его основе тематических продуктов Global Forest Change Map и Eastern Europe's forest cover change. Методика основана на выявлении узких и протяженных сплошных ветровалов, с последующей верификацией по снимкам высокого разрешения. Предлагаемый подход позволяет получить объективную (независимую от плотности населения и наблюдательной сети) оценку пространственно-временного распределения случаев смерчей в лесной зоне, выявить области их повышенной повторяемости, определить ряд характеристик смерчей (протяженность, среднюю и максимальную ширину пути смерча, направление вращения). Представлены результаты применения данной методики на региональном уровне для территории Пермского края и построена карта пространственного распределения случаев смерчей. Помимо данных дистанционного зондирования, для ее создания использован каталог случаев возникновения смерчей по данным Гидрометцентра РФ. Подтвержден вывод о повышенной смерчопасности северной части территории Пермского края.

Ключевые слова: смерчи, ветровалы, картографирование, данные дистанционного зондирования Земли, снимки LANDSAT

METHODS OF IDENTIFYING TORNADO WINDFALLS USING LANDSAT IMAGE DATA AND THEMATIC PRODUCTS GOT AFTER THESE DATA PROCESSING

©2016 Abdullin R., Shikhov A.

Perm State University, Russia
gis@psu.ru

Abstract. The article describes a method of identifying tornado cases in the forest zone, based on the forest windfall disturbance data. The retrospective analysis of forest windfall disturbances has been performed using the long-term LANDSAT data series and thematic products Global Forest Change Map and Eastern Europe's forest cover change. The method is based on identification of narrow and elongate areas of total forest windfall disturbances, with their subsequent verification by the high-resolution satellite images. The proposed approach makes it possible to objectively (that is independent of the population density and observation network) estimate the spatial and temporal distribution of tornado cases in the forested areas. It also allows identifying the areas with high frequency of tornado appearance, and estimating some tornado parameters (path length, the average and maximum width of tornado, and sense of rotation). The article presents results of applying this methodology at regional level for the Perm region, and mapping of the spatial distribution of tornado cases. In addition to remote sensing data, to create a map we have used the catalog of tornado cases on the Hydrometeorological Center of Russia. The results has confirmed a conclusion that the risk of tornado is relatively high in the northern part of the Perm region.

Keywords: tornadoes, forest windfalls disturbances, mapping, remote sensing data, LANDSAT images

Введение. В связи с ростом повторяемости и интенсивности опасных явлений (ОЯ) погоды в период современного изменения климата, актуальность их изучения не вызывает сомнений. Для разработки мероприятий, нейтрализующих и смягчающих воздействие ОЯ, необходимо получение количественных оценок вероятности их возникновения и возможной интенсивности [1–3]. Получению объективных данных о пространственно-временном распределении случаев опасных явлений погоды на региональном уровне препятствует ряд объективных сложностей. Во-первых, это проблема дефицита исходной информации. Опасные метеорологические явления относятся к событиям редкой повторяемости, и часто массив данных о зафиксированных случаях недостаточен для обнаружения каких-либо закономерностей их пространственного распределения. Кроме того, многие случаи ОЯ пропускаются существующей редкой наблюдательной сетью, в связи с чем получение однородного ряда данных о них крайне затруднительно.

Наибольшие сложности возникают при картографировании случаев локальных опасных явлений погоды (сильных ливней, крупного града, шквалов и смерчей). Для решения этой задачи необходимо привлечение информации о нанесенном ими ущербе (поскольку более половины случаев таких явлений фиксируется именно на основе данных об ущербе). Особый интерес представляет оценка повторяемости такого редкого и опасного погоды, как смерчи (торнадо), которые практически никогда не фиксируются метеостанциями. Информация о факте прохождения смерча обычно поступает от непосредственных очевидцев явления, а также на основе анализа нанесенного ущерба. Актуальных и репрезентативных оценок повторяемости смерчей на территории как всей России, так и отдельных регионов не существует. Систематизация сведений о случаях возникновения смерчей проводилась А.И. Снитковским в 1987 г. [4], а также в Гидрометцентре РФ (за период 1987–2001 г.) [5, 6]. В этих работах приведены данные о более чем 350 случаях смерчей, зафиксированных на территории России. В последующие годы актуализация этих данных не проводилась.

С появлением в открытом доступе много-

летних рядов данных спутниковых наблюдений съемочных систем LANDSAT и MODIS появилась возможность идентификации случаев прохождения смерчей по вызываемым ими ветровальным нарушениям лесной растительности. В зарубежных странах данные о ветровалах, полученные путем анализа снимков LANDSAT, используются для изучения последствий прохождения смерчей еще с 80-х гг. XX в. [7]. Для оперативного определения траекторий и уточнения характеристик смерчей (протяженности пути и ширины воронки смерча) в США используются также снимки низкого разрешения MODIS [8]. Важные характеристики смерча (в частности, направление его вращения и характер распределения скорости ветра у поверхности земли) можно уточнить на основе анализа снимков сверхвысокого разрешения и аэрофотоснимков [9].

Таким образом, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются важным источником информации для изучения и картографирования случаев смерчей, в том числе на региональном уровне. Для территории России это особенно актуально, в связи с низкой плотностью населения и сети метеостанций. В регионах с высокой лесистостью и низкой плотностью населения (таких, как север Европейской части России и Урала) анализ ветровальных нарушений лесного покрова является единственным доступным источником информации о случаях смерчей. По данным о ветровалах может быть определена траектория движения смерча, ширина воронки, направление вращения, сделаны предположения об интенсивности смерча. Основными преимуществами такого подхода является объективность получаемых оценок.

Оценка риска возникновения смерчей актуальна и для территории Западного Урала. В 2009 и 2014 гг. в регионе были зафиксированы два случая возникновения сильных смерчей [10]. Анализ крупных ветровалов, произошедших в последние 15 лет на Западном Урале, позволил выявить 7 случаев прохождения смерчей в регионе [11]. Также сведения о нескольких случаях смерчей, наблюдавшихся за последние 30 лет и нанесших материальный ущерб, имеются в базах данных, созданных в Гидрометцентре РФ.

В настоящей работе описана методика

идентификации случаев возникновения смерчей в лесной зоне на основе анализа многолетних рядов космических снимков LANDSAT и полученных на их основе тематических продуктов. Представлены результаты применения данной методики на региональном уровне для территории Пермского края.

Исходные данные и методы исследования. В настоящее время космический мониторинг ветровалов в России проводится, главным образом, на основе бесплатных снимков со спутников серии LANDSAT. Наличие многолетнего ряда данных однородного разрешения позволяет изучать особенности пространственного распределения и другие характеристики ветровалов за 30-ти летний период [12, 13]. Для анализа изменений лесного покрова (в том числе вызванных ветровалами) за продолжительный период, помимо исходных снимков LANDSAT могут быть использованы также готовые тематические продукты, полученные на их основе: Global Forest Change Map и Eastern Europe's forest cover change [14, 15].

Проект Global Forest Change был реализован группой специалистов Мэрилендского университета в 2012 г. На основе анализа временного ряда снимков LANDSAT (всего было обработано 654 178 сцен) были получены данные о лесопокрытой площади по состоянию на 2000 и 2014 гг., участках нарушений лесного покрова (forest loss) и лесовосстановления (forest gain) в глобальном масштабе с пространственным разрешением 30 м [14]. Данные Global Forest Change находятся в свободном доступе в Интернете. Данные о нарушениях лесного покрова, классифицированные по годам (Forest Loss Year), предоставляются в виде целочисленных растров в формате GeoTIFF, в разграфке $10 \times 10^\circ$ по широте и долготе. В ряде случаев год появления нарушения определен неверно, что обусловлено влиянием облачности, а также тем, что в проекте использованы только сцены LANDSAT, полученные в течение вегетационного периода.

В продолжение проекта Global Forest Change в 2015 г. была создана карта изменений лесного покрова Восточной Европы за период с 1985 по 2012 гг. (Eastern Europe's forest cover change). Для создания этой карты использовался весь архив спутниковых снимков LANDSAT

TM и ETM+ за период с 1985 по 2012 гг. и усовершенствованный алгоритм обработки данных [15]. Были выделены участки нарушений лесного покрова за периоды 1985–1990, 1991–2000, 2001–2006 и 2006–2012 гг.

В данных Global Forest Change и Eastern Europe's forest cover change (имеющихся в свободном доступе в Интернете) отсутствуют сведения о типах нарушений лесного покрова. Однако использование геометрических дешифровочных признаков и дополнительных данных (включая исходные снимки LANDSAT, а также архивные снимки сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов) позволяет достаточно надежно идентифицировать ветровалы, вызванные прохождением смерчей, среди других типов нарушений. Для идентификации смерчевых ветровалов производилась конвертация исходного растра, содержащего данные о нарушениях лесного покрова (Forest Loss Year), в векторное представление данных. В полученных векторных наборах данных выполнялся поиск объектов, удовлетворяющих следующим критериям:

1. Характерные размеры полигона $L=3 \dots 50$ км, $M=50 \dots 1000$ м, длина превышает ширину более чем в 10 раз;

2. Сплошной характер повреждения древостоя (может быть определен по исходным снимкам LANDSAT, полученным с веб-ресурса Геологической службы США);

3. Линейная структура полосы повреждения древостоя, отличающая смерчевые ветровалы от шкваловых, для которых характерна линейно-веерная структура и мозаичный характер повреждений.

Примеры применения данной методики для идентификации смерчевого ветровала, произошедшего 7 июня 2009 г., приведены на рис. 1, 2. Дополнительная проверка объектов, идентифицированных как смерчевые ветровалы, производилась по снимкам сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов. Важнейшим признаком смерчевого ветровала является вихревой характер повала деревьев (при этом прослеживается вращение против часовой стрелки). На ветровалах, вызванных шквалами, вектор вывала деревьев совпадает с направлением ветра при шквале. Примеры снимков сверхвысокого разрешения

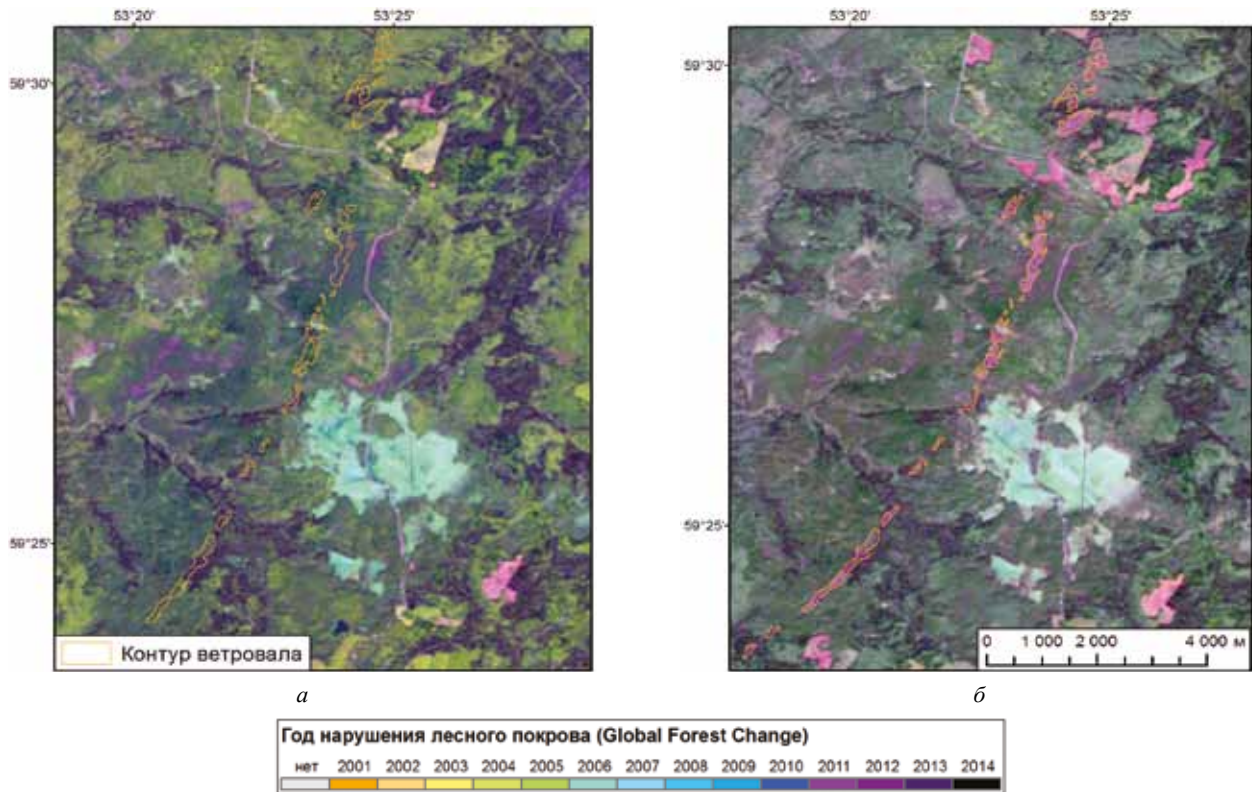


Рис. 1. Снимок LANDSAT-5 TM:
а — за 18.08.2007 г. (до смерча); *б* — за 08.09.2009 г. (после смерча)

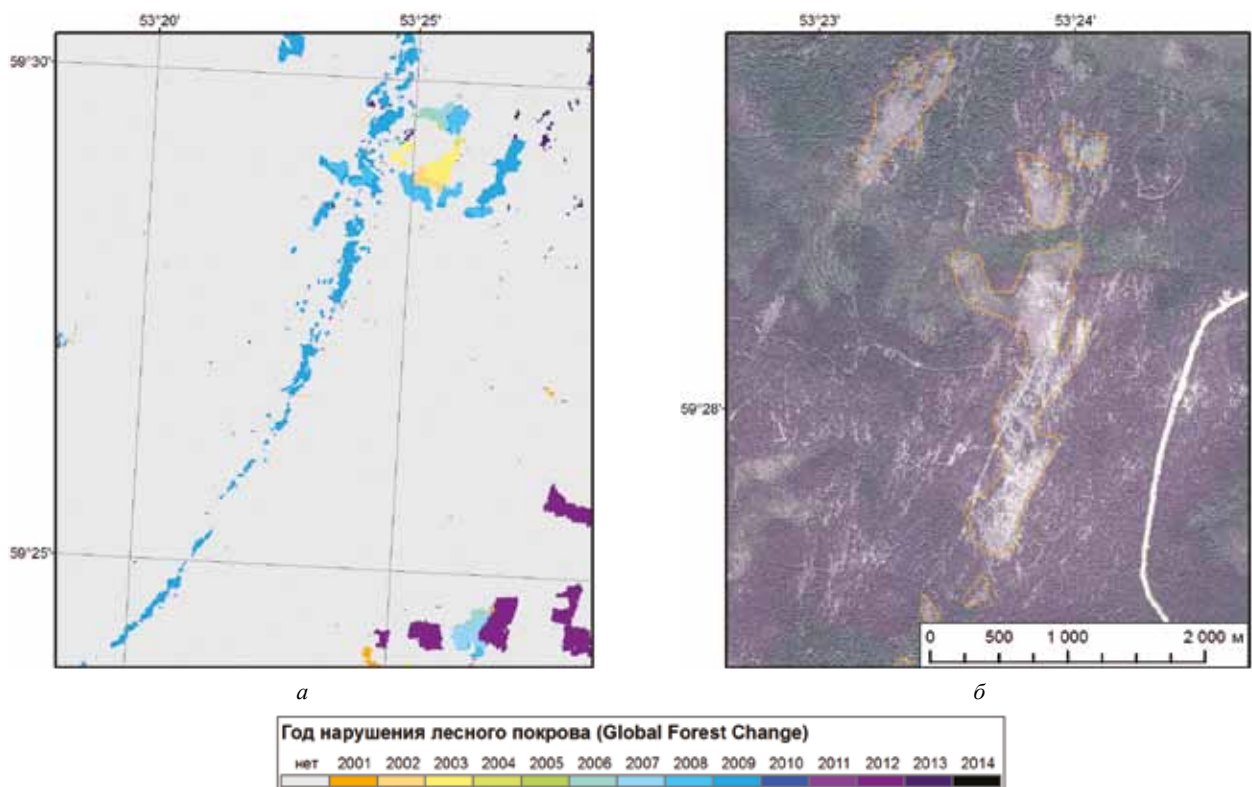


Рис. 2. Нарушения лесного покрова по данным GlobalForestChange (*а*) и фрагмент снимка сверхвысокого разрешения на участок ветровала (*б*)

участков шквального и смерчевого ветровалов приведены на рис. 3, 4.

Определение даты прохождения смерча производилось с использованием дополнительных данных спутниковых наблюдений и реанализа. Для каждого смерчевого ветровала устанавливался период его появления на основе мультитременного анализа всех имеющихся снимков со спутников LANDSAT из архивов USGS (Геологической службы США). Поскольку часть снимков невозможно было использовать из-за облачности, точность определения даты прохождения смерча по снимкам LANDSAT составляла обычно 1–2 месяца. Для ветровалов, произошедших в период до 1999 г., отсутствие качественных снимков LANDSAT не позволяло установить дату даже с точностью до года. Для уточнения даты прохождения смерчей были использованы также зимние безоблачные снимки Terra/Aqua MODIS с пространственным разрешением 250 м. По ним могут быть обнаружены сплошные ветровалы шириной от 150–200 м.

В дальнейшем дата прохождения смерча

уточнялась с использованием информации о направлении его движения, а также данных реанализа метеорологических полей по модели CFS (NCEP, США). Использование данных реанализа позволяет выявить случаи, когда над изучаемой территорией наблюдались благоприятные условия для возникновения смерча, а направление ветра совпадало с направлением его перемещения (которое устанавливалось по спутниковым снимкам ветровалов). Таким способом были уточнены даты возникновения нескольких случаев смерчей в 2006 и 2009 гг.

Помимо данных реанализа для уточнения даты возникновения смерчей анализировались наблюдения метеостанций, ближайших к месту обнаружения ветровала, и сведения, опубликованные в СМИ. В ряде случаев это также позволило установить дату, когда наблюдался смерч.

Результаты и обсуждение. Всего на территории Пермского края в период с 1981 по 2015 гг. произошло 18 случаев смерчей, основные характеристики которых приведены в таблице. Их пространственное распределение

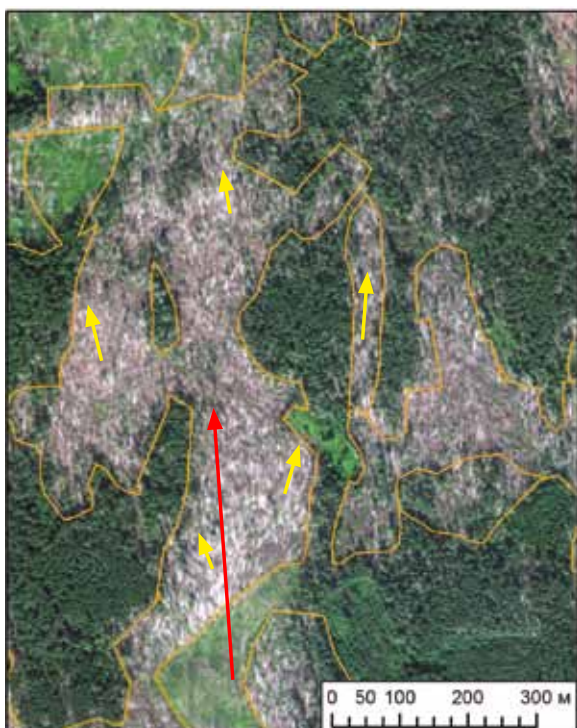


Рис. 3. Ветровал от шквала 18.07.2012 г., Кочевский район:

→ — направление ветра при шквале; → — вектор вывала деревьев; □ — контур ветровала

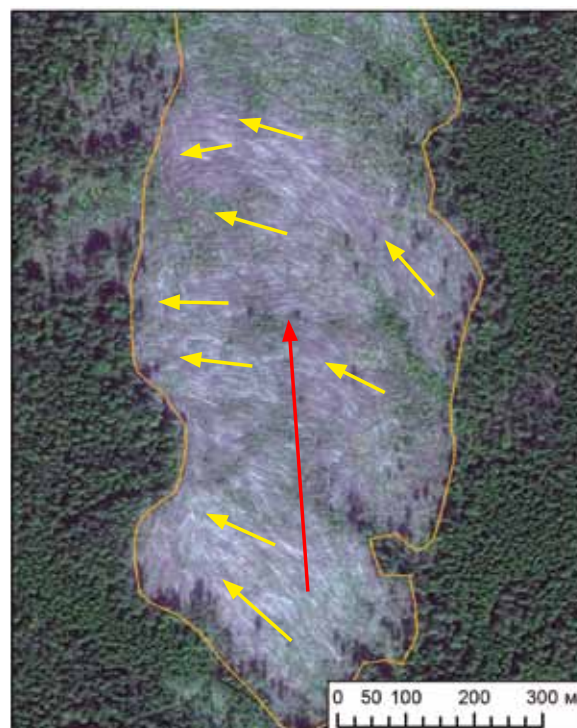


Рис. 4. Ветровал от смерча 07.06.2009 г., Гайнский район:

→ — направление движения смерча; → — вектор вывала деревьев; □ — контур ветровала

показано на рис. 5. Для выявления зон повышенного риска возникновения смерчей была рассчитана плотность их пространственного распределения с использованием модуля Spatial Analyst программного пакета ArcGIS. Более подробно методика расчета описана в работе [16].

Основной максимум частоты возникновения смерчей расположен в северо-западной части Пермского края (> 4 случаев/10000 км²), а вторичный максимум расположен на юго-западе территории (3 случая/10000 км²). При этом практически все случаи сильных смерчей наблюдались на северо-западе края.

Из 18 случаев смерчей 12 были выявлены

по результатам анализа данных ДЗЗ, 4 случая представлены в базах данных Гидрометцентра РФ и Пермского ЦГМС, и по одному случаю зафиксировано очевидцами и наблюдателями на метеостанциях. Таким образом, использование предложенной методики позволяет пересмотреть существующие оценки риска возникновения смерчей на Западном Урале [16].

Большинство случаев смерчей наблюдалось в июне, второй максимум повторяемости приходится на август. Известно, что именно в июне в атмосфере наиболее часто складываются условия для развития торнадо (сильная конвективная неустойчивость в сочетании с высокой скоростью ветра и изменением его на-

Перечень случаев смерчей, зафиксированных на территории Пермского края за период с 1981 г.

№ п/п	Место прохождения смерча	Дата	Длина пути, км	Ширина пути (средняя/ максимальная), м	Источник данных	Ущерб
1	Кочевский район	1984 г. (август)	11	300/800	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 180 га
2	Косинский район	1984 г. (август)	29,5	250/450	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 640 га
3	Александровский район	1984 г. (август)	42,5	400/550	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 790 га
4	г. Оханск	31.05.1988	—	600	ГМЦ РФ	Повреждение домов, ЛЭП, массовый повал деревьев
5	Красновишерский район	1989 г.	7,1	150/250	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 67 га
6	с. Бол. Соснова	18.06.1990	—	—	ГМЦ РФ	Разрушение построек, повреждение ЛЭП, линий связи.
7	с. Бол. Соснова, дер. Левино, дер. Медведево	29.06.1993	—	100	ГМЦ РФ	Повреждено 70 домов, 3 человека ранены.
8	Александровский район	08.06.1996	6,7	200/310	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 126 га
9	Гайнский район	04.06.2005	17	200/500	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 227 га
10	Гайнский район	2006 г. (июнь)	5	300/550	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 117 га
11	Чердынский район	2006 г. (июнь)	14,5	125/275	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 126 га
12	Чердынский район	2006 г. (июнь/июль)	2,6	120/290	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 25 га
13	с. Русский Сарс, дер. Тюинск	24.05.2007	4	50/100	Пермский ЦГМС, данные ДЗЗ	Сорваны крыши домов, ущерб 494 тыс. руб.
14	Краснокамский район, д. Алешиха	30.08.2008	6	150/250	Данные ДЗЗ	Повреждены постройки, опоры ЛЭП, пострадал 1 чел. Ветровал на площади 60 га
15	г. Верещагино	07.06.2009	—	—	МС Верещагино	Нет данных
16	Юрлинский район	07.06.2009	19	125/250	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 141 га
17	Гайнский район	07.06.2009	50	400/900	Данные ДЗЗ	Повреждены дома в с. Кебраты и Шордын. Ветровал на площади 1263 га
18	Гайнский район	07.06.2009	20	200/350	Данные ДЗЗ	Ветровал на площади 174 га

правления с высотой). В то же время в середине лета риск возникновения смерчей значительно снижается.

Из 18 случаев смерчей 4 наблюдались в течение одного дня, 7 июня 2009 г. В этот же день в Гайнском районе наблюдался и наиболее сильный смерч, длина пути которого составила 50 км, а ширина полосы разрушений – до 900 м. Более подробно этот случай рассмотрен в работе [10]. Также сильные смерчи наблюдались в августе 1984 г. в Кочевском, Косинском и Александровском районах. Большинство смерчевых ветровалов имеет протяженность до 20 км и максимальную ширину 200–500 м. Категорию интенсивности смерча по характеру ветровала определить невозможно, поскольку практически все смерчевые ветровалы – сплошные. Возможно выполнение лишь приблизительных оценок интенсивности на основе протяженности и ширины пути смерча.

Заключение. Использование многолетних рядов данных космической съемки LANDSAT и тематических продуктов их обработки, а также снимков сверхвысокого разрешения с открытых картографических сервисов позволило получить новые данные о пространственном распределении случаев смерчей на Западном Урале в условиях современного изменения климата. Преимуществами использованной методики является ее объективность и независимость от плотности населения и наблюдательной сети. Результаты анализа данных ДЗЗ за 30-ти летний период подтверждают сделанные ранее предположения о сравнительно высокой смерчеопасности северо-западной части территории Пермского края. Это может быть связано как с синоптическими условиями (над данной территорией чаще наблюдаются благоприятные условия для развития смерчей), так и с высокой залесенностью, которая способствует повышению влажности воздуха и интенсивному развитию конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00245-а, 16-45-590056-р-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллин Р.К., Шихов А.Н. Картографирование пространственно-временного распределения опасных метеорологических явлений в Пермском крае // Вестник Удмуртского Университета, Сер. Биология. – 2015. – №4. – С. 98–106.

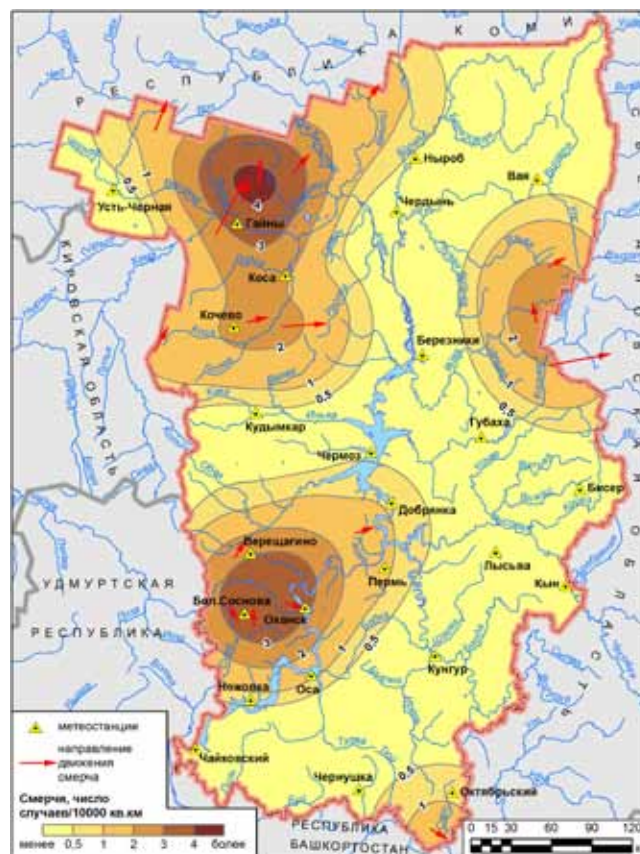


Рис. 5. Пространственное распределение случаев смерчей в Пермском крае за период 1981 – 2015 гг.

2. Панфутова Ю.А. Опасные метеорологические явления на равнинной территории России и риски, создаваемые ими: автореф. дис. канд. геогр. наук. СПб. 2008. 21 с.

3. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Изд-во ООО «Раритет-Пермь», 2014. – 296 с.

4. Снитковский А.И. Смерчи над территорией СССР // Метеорология и гидрология. – 1987. – №9. – С. 12–25.

5. Брюхань Ф.Ф., Ляхов М.Е., Погребняк В.Н. Смерчеопасные зоны в СССР и размещение атомных станций // Известия АН СССР. Сер. Географич. – 1989. – № 1. – С. 40–48.

6. Руководство по безопасности РБ-022-01. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии. М.: Госатомнадзор РФ, 2001. – 29 с.

7. Dyer R.C. Remote sensing identification of tornado tracks in Argentina, Brazil, and Paraguay // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988, Vol. 54, PP. 1429-1435.

8. Jedlovec, G.J., U. Nair and S.L. Haines. Detection of storm damage tracks with EOS data // Weather and Forecasting. 2006. Vol. 21. PP. 249–267.

9. Beck V. and N. Dotzek. Reconstruction of near-surface tornado wind fields from forest damage // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2010. Vol. 49. PP. 1517-1537.

10. Шихов А.Н., Быков А.В. Изучение двух случаев сильных смерчей в Предуралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. – 2015. – Т. 12. – № 3. – С. 124–133.

11. Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 21–30.

12. Крылов А.М., Малахова Е.Г., Владимирова Н.А. Выявление и оценка площадей катастрофических ветровалов 2009–2010 гг. по данным космической съемки // Изв. Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2012. – Вып. 200. – С. 197–208.

13. Петухов И.Н., Немчинова А.В. Ветровальные нарушения лесного покрова в Костромской области и на сопредельных территориях в 1984–2011 гг. // Лесоведение. – 2014. – № 6. – С. 16–24.

14. Hansen M.C., P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S.A. Turubanova, I.A. Tyukavina, D. Thau, S.V. Stehman, S.J. Goetz, T.R.

Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C.O. Justice and J.R.G. Townshend. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // SCIENCE. 2013. Vol. 342. PP. 850–853.

15. Potapov P.V., S.A. Turubanova, A. Tyukavina, A.M. Krylov, J.L. McCarty, V.C. Radeloff, and M.C. Hansen. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // Remote Sensing of Environment, 2015, Vol. PP. 28–43.

16. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала: Справочник специалиста. Ч. 3. Л.: Гидрометеониздат, 1987. – 200 с.

Принята к печати 3 июня 2016 г.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НОРМАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ НА ПРИМЕРЕ ВОЗ, ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА, РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ФИНЛЯНДИИ, ШВЕЦИИ И НОРВЕГИИ

©2016 К.В. Поддубная

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

kristina.poddubnaya@gmail.com

Аннотация. В связи с возникновением в последние годы проблем защиты окружающей среды северных территорий, особенно в зонах интенсивного экономического развития, возникает необходимость уточнения эффективности существующих норм предельного техногенного воздействия на окружающую среду в природных условиях северных территорий. В этом отношении представляют интерес сравнительные оценки отечественных (Российской Федерации) и северных соседей – скандинавских стран (Норвегии, Финляндии, Швеции) нормативных показателей предельных воздействий промышленных выбросов (поллютантов) на окружающую среду и население.

Ключевые слова: нормативные показатели загрязнения окружающей среды, поллютанты, окружающая среда, северные территории

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL POLLUTION INDICES DATA OF WHO, EU, THE RUSSIAN FEDERATION, FINLAND, SWEDEN AND NORWAY WERE TAKEN AS AN EXAMPLE

©2016 Poddubnaya K.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

kristina.poddubnaya@gmail.com

Abstract. Recently there have been many problems in a field of environment protection of the northern territories particularly in areas of intensive economic development. So the need of clarifying the effectiveness of limits on environment pollution indicators in the natural environment of the northern territories has arisen. There's particular interest to consider the comparative assessments of national (Russian Federation) limit value standards of industrial emissions (pollutants) on the environment and human well-being and those of our northern neighbors — the Scandinavian countries (Norway, Finland, Sweden).

Keywords: Regulatory environment pollution indicators, pollutants, environment of the northern territories

В качестве основных поллютантов для сравнения нормативных показателей предельных воздействий загрязняющих веществ рассматриваются: диоксид азота; бензол; озон; оксид серы; оксид углерода и взвешенные частицы (PM10), являющиеся основными компонентами выбросов от промышленных предприятий Норвегии, Швеции, Финляндии и России. Установленные в РФ предельные до-

пустимые концентрации (ПДК) являются основным показателем предельного воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду и здоровье населения [1]. В скандинавских странах предельные воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду оцениваются в показателях их концентраций (мг/м³). В большинстве случаев эти величины отражают и рекомендации ЕС в области охраны окру-

жающей среды, и национальные особенности по охране окружающей среды. Нормативные показатели северных соседей отражают их политику на сохранение окружающей среды, на развитие экономики, на наличие защитных технологий биоты и экосистем с учетом географических и природных условий этих северных территорий. Различия нормативных показателей предельных воздействий основных загряз-

няющих веществ в РФ, ВОЗ, ЕС, Финляндии, Швеции и Норвегии представляет определенный научный и практический интерес, характеризующий методологический подход этих государств к охране окружающей среды. Эти данные представлены в таблице.

Анализ материалов таблицы показывает, что установленные в РФ нормативные показатели для большинства поллютантов более

Нормативные показатели предельных воздействий основных загрязняющих веществ (мг/м³) в РФ, ВОЗ, ЕС, Норвегии, Швеции и Финляндии

Загрязняющее вещество	Время осреднения	Россия	ВОЗ	ЕС	Норвегия	Швеция	Финляндия
СО	15 мин	—	100	—	—	—	—
	30 мин	5	60	—	—	—	—
	1 ч	—	30	—	—	—	—
	8 ч	—	10	10	10	10	10
	24 ч	3	—	—	—	—	—
NO ₂	30 мин	0,2	—	—	—	—	—
	1 ч	—	0,2	0,2 Не должна быть превышена более чем 18 раз за год	0,2 Не должна быть превышена более чем 18 раз за год	0,2 Не должна быть превышена более чем 18 раз за год	0,2
	24 ч	0,04	—	0,125 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год.	—	0,06 Не должна быть превышена более чем 7 раз за год	—
	Средняя за год	—	0,04	0,04	0,04	0,04	—
O ₃	30 мин	0,16	—	—	—	—	—
	1 ч	—	—	—	—	—	—
	8 ч	—	0,12	—	—	0,12	0,12
	24 ч	0,03	—	—	—	—	—
SO ₂	10 мин	—	0,5	—	—	—	—
	30 мин	0,5	—	—	—	—	—
	1 ч	—	—	0,350 Не должна быть превышена более чем 24 раза за год	0,350 Не должна быть превышена более чем 24 раза за год	0,350 Не должна быть превышена более чем 24 раза за год	0,350
	24 ч	0,05	0,125	0,125 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год.	0,125 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год.	0,125 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год.	0,125
	Средняя за год	—	0,05	0,02	0,02(ПДК для защиты экосистем)	0,02	—
PM10	30 мин	0,3	—	—	—	—	—
	24 ч	0,06	—	0,05 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год	0,05 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год	0,05 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год	0,05 Не должна быть превышена более чем 3 раза за год
	Средняя за год	—	0,05	0,02	0,04	0,04	—
Бензол	30 мин	0,3	—	—	—	—	—
	24 ч	0,1	—	—	—	—	—
	Средняя за год	—	—	0,005	0,005	0,005	—
	UR/LifeTime	—	6·10 ⁶	—	—	—	—

строгие (за исключением бензола), чем стандарты качества воздуха, рекомендованные ВОЗ и установленные в Европейском Союзе, Финляндии, Швеции и Норвегии. Это различие обусловлено тем, что на территории РФ (Мурманской области) загрязнение окружающей среды осуществляется в больших объемах на ограниченных территориях (промышленные зоны АО «Кольская ГМК»). Нормативные показатели в РФ по оксиду углерода, оксиду серы и диоксиду азота в два раза меньше, а по озону в три раза меньше, чем в Швеции, Финляндии и Норвегии. По бензолу и печной пыли (PM10) в Скандинавских странах показатели предельной токсичности ниже, чем в РФ.

Установленные требования к предельным концентрациям поллютантов в Финляндии, Швеции и Норвегии можно объяснить тем обстоятельством, что в этих странах отсутствуют большие концентрации промышленных производств с выбросом больших объемов поллютантов как, например, Кольская горно-металлургическая компания (АО «Кольская ГМК»). За последние три года средние значения SO_2 на станциях измерения вблизи города Заполярный и поселка городского типа Никель на терри-

тории Мурманской области во время летних и зимних периодов, соответственно, были в 5–16 раз выше, чем на станциях измерения в Норвегии (по материалам доклада российско-норвежской комиссии по экологическому сотрудничеству от 04.03.2015 г.), что приводит к многократному повышению ПДК в районах горнометаллургических комбинатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буров В.Н., Малинников В.А. Экология. –М.: Изд-во МИИГАиК, 2009.
2. «Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест" ГН 2.1.6.1338-03", утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 21 мая 2003 года утверждено постановлением от 30 мая 2003 года № 114 О введении в действие ГН 2.1.6.1338-03 (с изменениями на 12 января 2015 года).
3. Качество атмосферного воздуха и здоровье. Информационный бюллетень №313. Всемирная Организация здравоохранения, 2014 г.
4. Air Quality Standards. Environment Directorate-General of the European Commission, Belgium, 2016.
5. Swedish Code of Statutes. Air Quality Ordinance; SFS 2010:477. Thomson Reuters Professional AB, 2010.
6. Pollution Regulations, Chapter 7. Local air quality. Norwegian Environment Agency, 2012.
7. Government Decree on Chemical Agents at Work No. 715/2001. Helsinki, Ministry of Social Affairs and Health, 2001.

Принята к печати 21 апреля 2016 г.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС КАК ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПОНЯТИЕ

©2016 В.Н. Буров, К.В. Поддубная

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

Kristina.poddubnaya@gmail.com

Аннотация. Рассматривается влияние эволюционных процессов в экстремальных условиях изменения окружающей среды под воздействием техногенных факторов и формирование на этой основе понятия эволюции биоты, как основного фактора экологического кризиса. Статья посвящается 2017 году, году экологии в России. Цель исследования — совершенствование и развитие теоретических основ оценки состояния экологии.

Ключевые слова: экологический кризис, эволюция окружающей среды и биоты, биосфера, окружающая среда.

ECOLOGICAL CRISIS AS AN EVOLUTIONARY CATEGORY

©2016 Burov V., Poddubnaya K.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

Kristina.poddubnaya@gmail.com

Abstract. The article discusses the impact of evolutionary processes run in extreme conditions of environmental change under the influence of anthropogenic factors. On this basis the concept of biota evolution as the main factor of the ecological crisis is forming. This article is dedicated to the 2017 year as a year of ecology in Russia, and it calls to improve and develop the theoretical framework for assessing the state of the environment.

Keywords: ecological crisis, evolution of the environment and biota, biosphere, environment

Рассматривая экологический кризис как эволюционное понятие, мы, прежде всего, уточняем: что такое эволюционное понятие.

Сам термин «эволюция» чаще всего применяется для обозначения истории и процессов развития биоты в конкретных условиях

окружающей среды или биосферы в целом. Эволюционные процессы — это целый комплекс непрерывных и взаимосвязанных изменений биоты, где формирование и разрушение биотических сообществ всецело зависит от свойств биосферы. Здесь следует уточнить: что биосфера — это тоже понятие глобальное, и эволюция, в широком смысле, тоже понятие глобальное. Биосфера как многофакторная система постоянно находится в динамике ее изменения под воздействием геологических, биологических, физических и химических естественных процессов на земле. Все эти процессы формируют устойчивые отклонения (изменения) показателей состояния окружающей среды, которые, в свою очередь, определяют эволюционные изменения биоты и экосистем. При резком (экстремальном) изменении условий внешней среды изменяются процессы эволюции биоты, нарушается устойчивость экосистем, их изменение или даже гибель.

Однако, как известно, экстремальные эволюционные процессы могут охватывать территории различного размера в глобальном, региональном или локальном масштабе, где имеет место резкое изменение условий окружающей среды. Такие изменения характерны для территорий с интенсивной хозяйственной деятельностью человека. Последствия хозяйственной деятельности человека на окружающую среду проявляются в изменении условий существования живых организмов, которые изменяют и масштабы, и скорости эволюционных процессов. Так, освоение человеком новых территорий изменяет условия существования биоты, что вызывает естественные процессы перестройки биоты, ее адаптацию к новым условиям окружающей среды, изменения или гибель экосистем.

Все эти изменения — это эволюционные процессы биоты в новых изменяющихся условиях окружающей среды. При этом, эти изменения идут по двум несогласованным направлениям: одно — как «Стратегия Природы» и второе — как «Стратегия Человека». Доминирование «Стратегии Человека» формирует признаки экологического кризиса, первыми признаками которого являются эволюционные изменения в экосистеме. Экосистема — образование динамичное, в котором числен-

ность ее составляющих может изменяться под действием внешних факторов. Эволюционные процессы в экосистемах в условиях стабильных внешних факторов окружающей среды идут без последствий снижения устойчивости экосистемы. Но если внешние факторы превышают адаптационные возможности видов и популяций, то обычные эволюционные процессы могут привести к гибели экосистемы.

Результаты эволюции прежде всего проявляются в процветании или гибели того или иного вида, снижении устойчивости экосистем или их гибели. Причем в этих эволюционных процессах могут наблюдаться кратковременные аномалии. Так, например, в зонах повышенного загрязнения атмосферы промышленными выбросами, резко снижается численность популяций лесных птиц — основных врагов лесных короедов. В свою очередь, в условиях отсутствия основных врагов и регуляторов численности, популяция короедов приводит к массовой гибели деревьев. Уменьшение биоразнообразия в такой лесной экосистеме приводит к снижению ее устойчивости или, даже, переход ее на нижние уровни сукцессии. Это эволюционное явление согласуется с принципом системного анализа Л. фон Берталанфи: устойчивость любой системы определяется не характеристиками и свойствами ее составляющих, а характером связей и взаимодействием между ними. В этом примере главным фактором изменения экологии среды являются эволюционные процессы в биологической среде под воздействием неблагоприятных техногенных воздействий. Весь этот процесс является не чем иным, как экологическим кризисом в результате эволюции биотической среды под действием техногенных факторов. Таким образом, основным признаком экологического кризиса являются эволюционные процессы в биотической среде, изменение видового и популяционного состава экосистем, превышающие их устойчивость в новых экстремальных условиях окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков А.В., Наймарк Елена. Эволюция. Классические идеи в свете новых открытий. М.: Соргус.—2014. — 636 с.
2. Берталанфи Л. фон. Общая теория систем — Критический обзор. М.: Прогресс, 1969. — 82 с.

Принята к печати 4 февраля 2016 г.

УДК 004:528

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

КОНТЕНТ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ПОРТАЛА ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

©2016 З.В. Левитская^{1,2}, В.В. Гаврилова¹

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

²ООО «Компания «СОВЗОНД», Москва Россия

zoyalevitskaya@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются тематические разделы геоинформационного портала Федерального агентства лесного хозяйства, которые предназначены для специалистов и руководителей профильных управлений и подведомственных организаций. Выделены и описаны такие блоки, как: Государственный лесной реестр, Государственная инвентаризация лесов, Охрана и защита лесов, Использование лесов, Воспроизводство лесов, Государственный лесной контроль и пожарный надзор в лесах и пр. В том числе приведены примеры тематических карт по различным блокам, которые наглядно демонстрируют особенности визуализации специальных данных. Описаны используемые в геоинформационном портале «Леса России» веб-сервисы, в том числе сторонние, а также возможности администратора по настройке свойств визуализации и доступа к пространственным данным различным группам пользователей.

Ключевые слова: геоинформационные системы, геоинформационный портал, ГИС, геопортал «Леса России», лесное хозяйство.

FEDERAL FORESTRY AGENCY GIS PORTAL

©2016 Levitskaya Z.^{1,2}, Gavrilova V.²

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

²SOVZOND Company Ltd., Moscow, Russia

zoyalevitskaya@gmail.com

Abstract. The topic sections of the Federal Forestry Agency GIS portal, designed for specialists and higher management and subordinate organizations are considered. The State Forest Register, the State forest inventory, the Forests Protection, the Usage of forests, the Forests Reproduction, the State forest monitoring and fire, etc. are identified and described GIS portal blocks. Examples of thematic maps for different sections are discussed, and the features of specific data visualization are demonstrated. Web-services, used in geographic information portal «Forests of Russia», including third-party, and administrator configuring capabilities for visualization properties and spatial data access for different groups of users are described.

Keywords: geographic information systems, geographic information portal, GIS, geoportal «Forests of Russia», forestry

В Российской Федерации использование геоинформационных технологий обусловлено необходимостью оперативного обнаружения и принятия управленческих решений в пожароопасный период, своевременного выявления незаконных мероприятий по вырубке леса и определения территорий, пораженных различными типами вредителей, и многими другими факторами [1].

Геоинформационный портал «Леса России» (ГИП «Леса России») представляет все сведения, накопленные в Федеральном агентстве лесного хозяйства, в едином картографическом интерфейсе, для обеспечения простого и надежного доступа к пространственной информации. В геоинформационном портале реализована возможность проведения автоматизированного анализа для быстрого

принятия решений при оценке территорий, формирования статистических и аналитических отчетов, прогнозов, обзоров.

Геоинформационный портал «Леса России» (рис. 1) реализован в виде веб-приложения, созданного с использованием технологии JavaScript, которое обеспечивает графическое отображение электронной карты и пространственных данных и предоставляет пользователю различные инструменты для работы с картами и данными. Например, в приложении реализованы возможности визуализации, навигации, масштабирования и определения длин и площадей, предполагается получение информации об объекте на карте и поиск (по названию и по координатам). Дополнительно реализован набор сложных специализированных запросов к данным с целью получения тематических карт и диаграмм.

Геоинформационный портал «Леса России» наполнен информацией необходимой для всех территориальных органов и подведомственных организаций, а именно созданы картографические слои, сгруппированные в тематические блоки. В статье особое внимание будет уделено таким блокам, как Государственный лесной реестр (ГЛР), Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ),

Охрана и защита лесов, Использование лесов, Воспроизводство лесов, Государственный лесной контроль и пожарный надзор в лесах, контроль за исполнением субъектами РФ переданных полномочий в области лесных отношений, Государственный кадастровый учет лесных участков. Разработанная структура базы данных, описанная авторами в статье «Структура и наполнение базы данных геоинформационного портала «Леса России», позволяет не хранить все атрибутивные данные статично в базе геоданных. Для оперативного получения актуальной информации используются сервисы взаимодействия с автоматизированной информационной системой государственного лесного реестра (АИС ГЛР) [2].

Тематический блок Государственный лесной реестр (ГЛР) содержит информацию о лесах и лесных ресурсах, а также об использовании лесов. В этом блоке, а также в некоторых других, данные могут быть представлены как в абсолютных величинах (в годах, гектарах, штуках), так и в условных единицах (в процентах).

Так цветовая схема отображения объектов тематических карт «Гари» из раздела «Характеристика лесов по целевому назначению» и «Леса, расположенные в водоохранных зонах» из раздела «Категории защитных лесов»

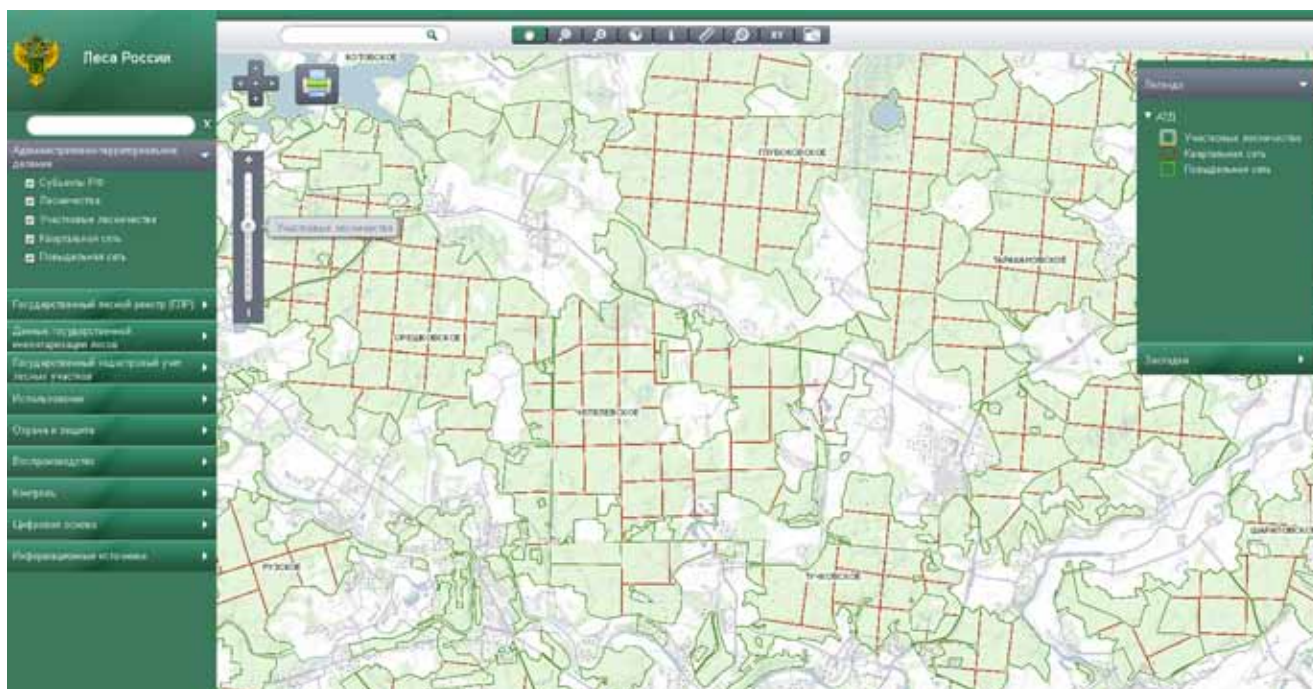


Рис. 1. Интерфейс геоинформационного портала «Леса России»

зависит от значений, выраженных в гектарах. А в тематической карте «Лесистость» из раздела «Состав земель лесного фонда» цветовая схема зависит от процентного соотношения. Пример карты представлен на рис. 2 и отображает отношение площади покрытых лесной растительностью земель к ее общей площади, выражаемое в процентах.

Тематический блок Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ) содержит оценку количественных данных показателей лесного фонда и эффективности мероприятий по охране, защите, воспроизводству лесов, а также данные мониторинга лесопользований и формирования федеральных информационных ресурсов по субъектам РФ. Тематические карты данного блока представлены в основном в абсолютных единицах, что позволяет узнать точные значения запасов леса (в тысячах кубических метров) и углерода (в тоннах), количества проверенных объектов и выявленных нарушений (в штуках), площадей лесных земель, лесов особо охраняемых природных территорий (ООПТ), лесов на землях обороны (в гектарах) и пр.

Тематический блок Охрана и защита лесов представлен тремя крупными разделами «Охрана лесов», «Защита лесов» и «Мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров» и предназначен для отображения сведений о качестве выполнения плана в части охраны лесов от пожаров, выявленных лесонарушениях и ущербе от лесонарушений. Также в этом тематическом блоке можно увидеть информацию об объектах и площадях лесопатологического обследования, очагах вредителей и болезней и мерах борьбы с ними, о классах пожарной опасности, зонах пожарного мониторинга, расположении пожарно-химических станций и многое другое. Особенно стоит отметить оперативные отчетные данные по зонам мониторинга, которые также представлены в данном блоке тематических карт, например «Количество крупных пожаров», «Процент ликвидации в день обнаружения» и пр.

Тематический блок Использование лесов содержит тематические карты, отражающие сведения о площадях, используемых для выполнения различных видов работ (для выращивания посадочного материала лесных растений,

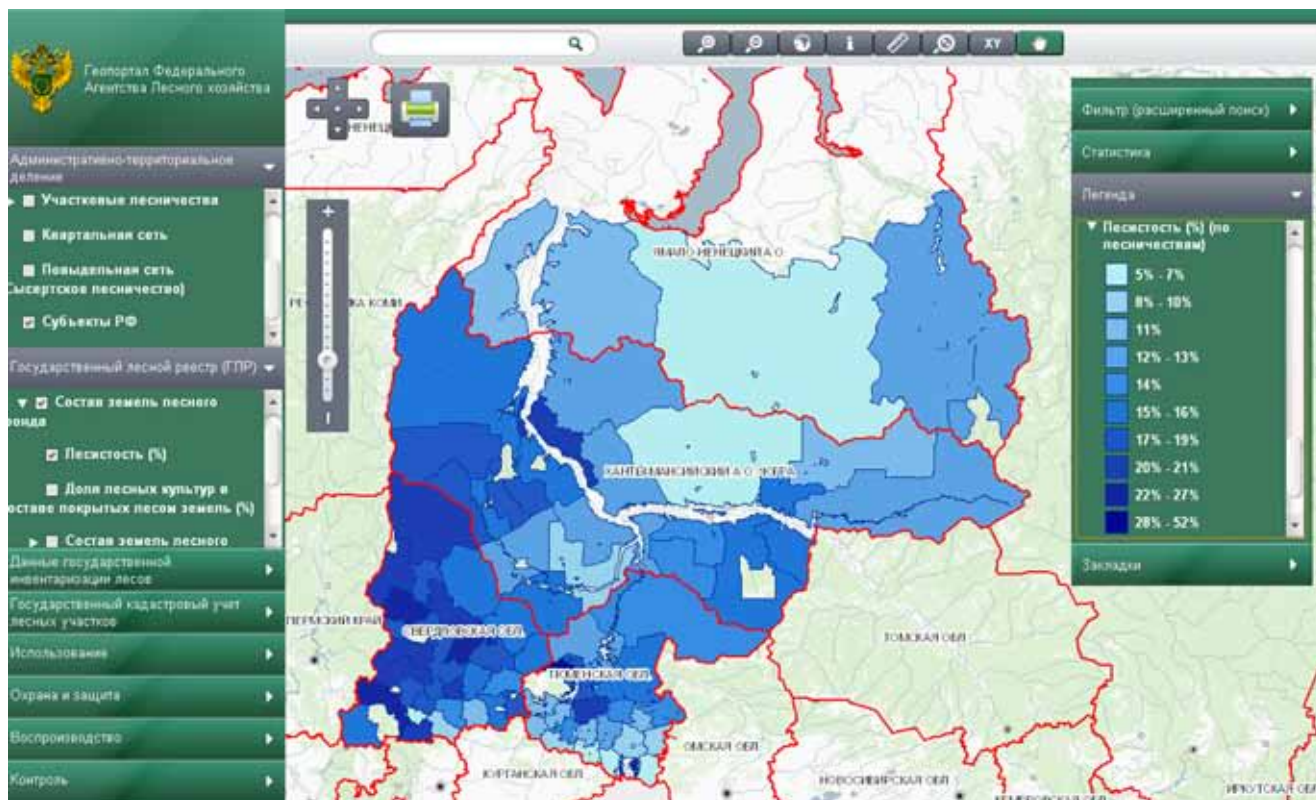


Рис. 2. Тематическая карта «Лесистость» на территории Уральского федерального округа

для ведения сельского хозяйства или осуществления религиозной деятельности), объемах заготовок хвойных, мягколиственных, живицы и т.д., расчетных лесосеках, включая данные по рубкам ухода и рубкам спелых насаждений. Эти и другие данные представлены как в абсолютных показателях площади (гектарах), так и в абсолютных показателях ликвидированного объема (тысячах кубических метров), что позволяет оценить соответствие оптимальным нормам пользования лесом, установленным при лесоустройстве. Дополнительно в данном блоке приведены сведения об аренде лесных участков и арендаторах.

Тематический блок Воспроизводство лесов содержит три крупных раздела тематических карт: лесовосстановление, лесоразведение и лесное семеноводство. В разделе «Лесовосстановление» представлены сведения о территориях и работах по созданию лесных культур на площадях, ранее покрытых лесной растительностью. В разделе «Лесоразведение» представлены сведения о территориях и работах по созданию лесных культур на площадях, ранее не занятых лесом. Раздел «Лесное семеноводство» содержит информацию о массовом производстве семян лесных растений с ценными наследственными свойствами и высокими

посевными качествами, их заготовке, обработке, хранении, реализации, транспортировке, использовании, а также семенном контроле. На рис. 3 представлена тематическая карта «Выполнение работ по заготовке семян лесных растений для лесовосстановления и лесоразведения» на территории Уральского федерального округа.

Тематический блок Государственный лесной контроль и пожарный надзор в лесах, контроль за исполнением субъектами РФ переданных полномочий в области лесных отношений в основном содержит слои для сравнения нормативного и фактического показателей количества государственных лесных инспекторов по субъектам и нагрузки на инспектора. Также в этом блоке описаны различные показатели административных правонарушений, например, количество выставленных протоколов на одного инспектора, количество наложенных или взысканных штрафов в разрезе правонарушителя – гражданин, должностное или юридическое лицо.

Тематический блок Государственный кадастровый учет лесных участков содержит такие тематические карты, как «Площадь лесного фонда, поставленного на кадастровый учет», «Количество лесничеств, поставленных

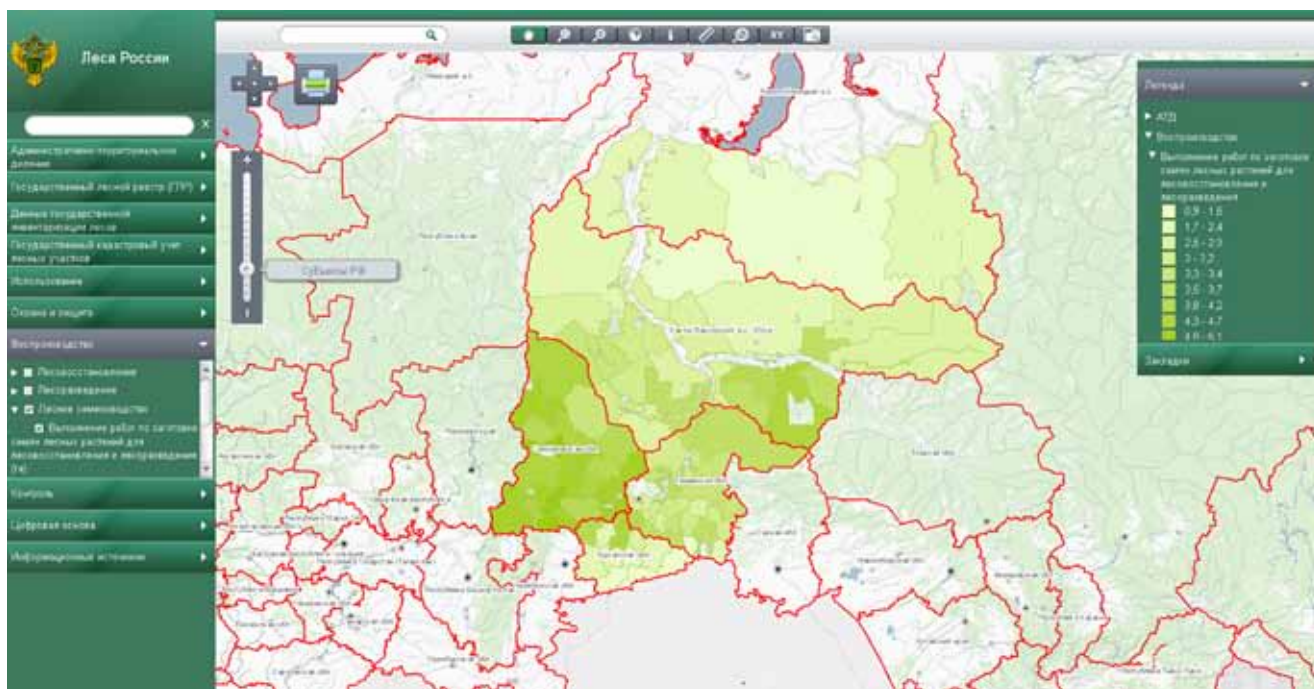


Рис. 3. Тематическая карта «Выполнение работ по заготовке семян лесных растений для лесовосстановления и лесоразведения» на территории Уральского федерального округа

на кадастровый учет», «Процент лесного фонда, поставленного на кадастровый учет».

Каждый тематический блок предназначен в первую очередь для работы специалистов и руководителей профильных управлений и подведомственных организаций. Так, например, блок Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ) специально разработан для Управления лесоустройства и земельных отношений, т.к. среди основных направлений деятельности этого управления можно выделить оценку состояния лесов, установление границ лесничеств, лесопарков, определение их количества и непосредственно государственную инвентаризацию земель, а также для федерального государственного бюджетного учреждения «Рослесинфорг», которое по Распоряжению Правительства РФ [3] было наделено функциями по государственной инвентаризации лесов проектированию лесничеств, лесопарков, эксплуатационных лесов, защитных лесов, резервных лесов, особо защитных участков леса, а также определению границ лесных участков в составе лесничеств и лесопарков. Но в целях оперативного взаимодействия и обмена информацией данный блок полностью или частично может быть доступен специалистам и руководителям других профильных управлений и подведомственных организаций.

В ГИП «Леса России» не используется стандартное деление на масштабные ряды типа «Страна – Федеральный округ – Субъект – Район – Город/Населенный пункт – Улица – Дом», которое является условно стандартным для общедоступных динамических карт. В геоинформационном портале Федерального агентства лесного хозяйства используется специализированное, применяемое исключительно в лесной отрасли, деление на единицы учета лесного фонда и проектирования лесохозяйственных мероприятий, а именно — «Страна – Субъекты – Лесничества – Участковые лесничества – Квартальная сеть – Повыведельная сеть». Именно такие слои были выделены в блоке Административно-территориальное деление.

Помимо указанных ранее блоков, в геоинформационном портале выделены — Административно-территориальное деление, Цифровая основа и Информационные источ-

ники. Они доступны всем пользователям ГИП «Леса России», имеют информационный характер и могут быть оперативно заменены либо дополнены.

В геоинформационном портале «Леса России» реализовано взаимодействие с сервисами Публичная кадастровая карта и Базовая топографическая основа, разработанными Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр). Такое взаимодействие реализовано посредством сервисов пространственных данных, что позволяет отображать данные Росреестра в виде отдельных слоев геоинформационного портала.

«Публичная кадастровая карта» (ПКК) — это справочно-информационный сервис для предоставления пользователям сведений Государственного кадастра недвижимости — государственного реестра, в котором содержатся сведения о недвижимом имуществе на всей территории Российской Федерации. В геоинформационном портале Федерального агентства лесного хозяйства отображаются такие кадастровые карты, как кадастровые округа, кадастровые районы, кадастровые кварталы, земельные участки и объекты капитального строительства.

Данный сервис в составе ГИП «Леса России» позволяет сопоставить границы земельных участков, относящихся к лесному фонду, проанализировать сведения, имеющиеся в Росреестре, например, получить информацию о кадастровой стоимости земельных участков.

«Базовая топографическая основа» — это справочно-информационный сервис для предоставления пользователям топографических данных: дороги, реки, озера, рельеф, строения, растительность и др., с учетом различных уровней детализации, соответствующих разным масштабным уровням карты.

Управление контентом ГИП «Леса России» происходит на веб-сервере в файлах веб-приложения. Администратор геоинформационного портала может управлять последовательностью отображаемых данных, их видимостью «по умолчанию» и возможностью применения свойств прозрачности отдельных веб-сервисов.

Практически все веб-сервисы, используемые в геоинформационном портале, являются картографическими, т.е. предоставляют пользователям доступ к созданной в Федеральном агентстве лесного хозяйства карте. Данная карта совместно с базовой топографической основой являются пространственной основой геопортала, расширяемой, при необходимости, пространственной информацией и дополнительным функционалом подключаемых веб-сервисов [4]. Например, администратор портала может расширить функциональность, предоставив пользователям возможность удаленного редактирования данных посредством веб-интерфейса. Все веб-сервисы базируются на общепринятых стандартах, таких как, например, OGS (Open Geospatial Consortium — открытый геопропространственный консорциум), которые позволяют использовать различные сервисы не только в одном конкретном портале, но и в порталах заинтересованных/сторонних лиц или в настольных ГИС [5].

Каждый из картографических сервисов, разработанных специально для геоинформационного портала «Леса России», имеет определенное назначение:

картографические веб-сервисы Cadastre, Control, Deyatelnost_Ispolzovanie, Deyatelnost_Vosproizvodstvo, GIL, GLR, Save соответствуют тематическим блокам Государственный кадастровый учет лесных участков, Государственный лесной контроль и пожарный надзор в лесах, контроль за исполнением субъектами РФ переданных полномочий в области лесных отношений, Использование лесов, Воспроизводство лесов, Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ), Государственный лесной реестр (ГЛР) и Охрана и защита лесов; картографический веб-сервис Granicy предоставляет доступ к данным блока Административно-территориальное деление.

Очевидно, что ГИП «Леса России» предоставляет пользователям доступ к большому количеству данных и тематических карт на их основе, при этом такой объем данных является оптимальным для принятия управленческих

решений в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов руководителями различных уровней. Необходимо отметить, что вся информация четко структурирована, разделена на тематические блоки и предоставляет пользователям актуальную и полную информацию о лесных ресурсах.

В статье приведены примеры тематических карт по каждому из тематических блоков, на которых видно, что все пространственные объекты окрашены в различные цвета или представлены символами различных размеров, исходя из того, в какой диапазон значений попадает показатель. Стоит отметить, что в ГИП «Леса России» реализована возможность просмотра более детальной информации об объектах, с использованием специализированного инструмента.

В статье также описаны картографические сервисы, используемые для расширения геоинформационного портала семантической информацией, и их наполнение, в том числе сервисы, разработанные Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левитская З.В. О создании открытого геоинформационного портала Федерального агентства лесного хозяйства / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 65–68 с.
2. Левитская З.В., Гаврилова В.В. Структура и наполнение базы данных геоинформационного портала «Леса России» // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2015. – №3. – С. 91–98.
3. Распоряжение Правительства РФ №1021-р от 10 июня 2014 г. О реорганизации федерального государственного унитарного предприятия «Рослесинфорг» в форме его преобразования в федеральное государственное бюджетное учреждение «Рослесинфорг».
4. Гаврилова В.В., Гречищев А.В., Лубнин Д.С. Пространственная основа геопорталов // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2011. – № 2. – С. 53–56.
5. Левитская З.В. Использование ГИС в лесной отрасли. Тезисы, Леса Евразии – Белорусское Поозерье: Материалы XII Международной конференции молодых учёных, посвященной 145-летию со дня рождения профессора Г.Ф. Морозова. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012. – С. 80–82.

Принята к печати 17 марта 2016 г.
Рекомендована кафедрой ВТ и АОИ МИИГАиК

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ «ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА»

©2016 Е.Б. Мельникова¹, К.А. Тамбиев²

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

²Компания «Меркатор», Москва, Россия

helen166@yandex.ru, Konstantintambiev@mail.ru

Аннотация. Известно, что для решения глобальных проблем, грозящих современному обществу, требуются значительные международные финансовые ресурсы и организационные усилия. К сожалению, многочисленных принятых законов и разработанных программ недостаточно для того, чтобы эти проблемы потеряли свою актуальность. Их решения находятся в сфере изучения многих наук, в том числе и картографии, способной представить сухие статистические данные в виде наглядных изображений и наиболее ярко показать остроту конкретной проблемы. Представлена классификация глобальных проблем и методика их картографирования на основе современных методов программирования для учебных целей.

Ключевые слова: глобальные проблемы, методика, классификация, учебное пособие, Adobe Flash Professional, action script 3,0, программирование, Excel, обработка статистических данных

«GLOBAL PROBLEMS OF HUMANITY» TEXTBOOK DEVELOPMENT METHODOLOGY

©2016 Mel'nikova E.¹, Tambiev K.²

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

²«Mercator Group», Moscow, Russia

helen166@yandex.ru, Konstantintambiev@mail.ru

Abstract. The gravity of global problems faced by modern society cannot be understated. Tackling these problems has been the object of significant international organizational efforts, as well as financial resources. Sadly, although there has been much legislation and many programs developed, they have been insufficient. These problems have been objects of study for many scientific disciplines, including cartography, which is able to present statistical data in the form of images that serve to highlight and demonstrate the acuteness of a particular problem. The present article contains a classification of global problems and a methodology required for their cartographic analysis based on modern software design methods with the aim of developing a textbook for university and high school-level students.

Keywords: global problems, method, classification, textbook, Adobe Flash Professional, action script 3.0, software design, Excel, statistical data analysis

Уже более полувека человечество обсуждает жизненно важные для населения планеты вопросы, получившие название «глобальные проблемы». В решении многих этих проблем принимают участие международные организации, такие, например, как Римский клуб, финансирующий исследования экологической направленности. Глобальным проблемам посвящена активная законодательная деятельность отдельных стран и Организации Объединенных Наций. К сожалению, многочисленных принятых законов и разработанных программ недостаточно для того, чтобы глобальная проблематика потеряла свою актуальность. В решении этих проблем не последнее место принадлежит картографии, способной представить сухие статистические данные в виде изображений и наиболее ярко и нагляд-

но показать остроту конкретной проблемы. Очевидно, что в связи с этим разработка методики картографирования комплекса глобальных проблем весьма актуальна.

Донести важность глобальных проблем до учащихся старших классов, колледжей и студентов – очень важная задача, так как именно им предстоит нивелировать эти проблемы в будущем. Наглядное обобщенное представление глобальных проблем в увлекательной и доступной форме может дать предлагаемое электронное интерактивное учебное пособие. Безусловно, данное пособие не преследует цель досконально обосновать теоретико-философские аспекты глобальных проблем, свою задачу мы видим в разработке конкретного, наглядного, в большей степени технического представления данных, характеризующих ту

или иную глобальную проблему.

На настоящий момент в мире существует всего два атласа, посвященных непосредственно глобальным проблемам: Atlas of Global Issues и Atlas of Global Development; A Visual Guide to the World's Greatest Challenges. Они изданы на английском языке и в российских библиотеках не представлены. Каждая проблема так или иначе была представлена в виде карт, но, во-первых, не в комплексе со всеми формирующими ее аспектами и, во-вторых, без учета того, что происходит постоянное изменение информационного наполнения базы данных по глобальным проблемам. Более того, они не показаны в виде взаимодополняющих факторов.

При картографировании глобальных проблем очень важна их классификация. Единого подхода к такой классификации на сегодняшний день не существует, а число выделенных проблем варьирует у разных авторов от 8–10 до 40–45. Известный географ В.П. Максаковский объясняет это тем, что помимо безусловно главных, приоритетных глобальных проблем существует целый ряд важных, но частных, таких как проблема преступности, наркомании, сепаратизма, техногенных катастроф, стихийных бедствий и пр. [1]. Основным свойством глобальных проблем является их взаимосвязанность: развитие одной проблемы вызывает обострение другой. Так, война может быть спровоцирована недостатком ресурсов (земельных, полезных ископаемых), а также негативными социальными явлениями (перенаселением, сепаратизмом).

Военные действия приводят к росту социальных проблем (повышенной смертности, голоду), нарушению экологического баланса (ядерному загрязнению, экстремальному нарушению почвенного покрова). Повышенная заболеваемость, смертность и энергосырьевые проблемы влекут за собой, в конечном счете, все те же экологические проблемы: нарушение почвенного покрова, экологические катастрофы, связанные с добычей и переработкой ресурсов. Вопросы классификации глобальных проблем освещались в трудах и учебных пособиях российских авторов — В.В. Загладина, И.Т. Фроловой [2], А.П. Кузнецова, Э.В. Ким [3], Е.Н. Домогацких, Н.И. Алексеевского [4] и В.П. Максаковского [1].

Предлагаемая нами унифицированная классификация включает собственно глобальные проблемы и формирующие их подпроблемы. Критерий для выделения проблем в категорию глобальных прост: обострение данной проблемы приведет человечество к вымиранию. Например, при современном уровне вооружения, крупный военный конфликт может приобрести характер массового уничтожения противников и поставить мир перед угрозой ядерной войны. В предлагаемой классификации выдержаны принципы приоритетности и взаимодополняемости. Так, в ней нет проблемы мирного освоения космоса, которую нельзя считать первоочередной в сравнении, например, с демографической проблемой. В сжатом варианте классификационная схема показана на рис. 1.

Для целей картографирования глобальных проблем во всемирном масштабе критерием глобальности может служить понятие пандемичности. Однако решающим фактором является социоприродная сущность, выделяющая их среди многих других экономических и политических проблем, которые, имея планетарное распространение, все же не могут претендовать на такой серьезный статус.

Главная задача создаваемого пособия — показать глобальные проблемы как последовательность взаимодополняющих явлений. С этой целью был изучен опыт работы портала Русского географического общества [5], портала «География» [6], Географического образовательного портала [7] и сайта Всемирного банка [8]. Концепция учебного пособия заключается в комбинировании элементов географического портала и атласа. Учебное пособие напоминает географический интернет-портал своей интерактивностью и разнообразием представленной информации. В электронном издании, как и в атласе, основу составляет комплексность и многосторонний подход к рассмотрению темы.

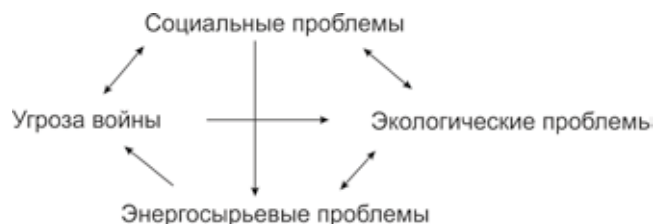


Рис. 1. Классификационная схема глобальных проблем

Структура электронного интерактивного пособия отличается от классического бумажного картографического издания. Страницы состоят из кадров, смена которых реализуется компонентом combobox, а также нажатием курсора на название проблемы в общей их схеме, представленной на первой странице-кадре пособия.

В соответствии со схемой в пособии 17 страниц-кадров, логически взаимосвязанных между собой и включающих 77 изображений, 16 видеороликов и 16 научно-популярных текстов. То есть на каждой странице информация представлена в виде графики (картинки в галерее), интерактивной карты, видеоролика и текста (рис. 2).

Практика внедрения изображений в картографические произведения в настоящее время широко распространена. Электронное пособие может включать неограниченное количество графики, отличающейся от бумажных произведений высоким качеством и масштабом изображения. Благодаря интерактивности здесь

удачно сочетаются два типа подачи данных – тактильный и зрительный.

Интерактивное пособие создавалось с помощью нескольких программ, позволяющих обрабатывать статистическую информацию и представлять её в виде графики. В нашем случае использовались следующие программы: Microsoft Excel (в ней выполнена основная часть работы), Adobe Flash Professional — для оптимизации процесса написания фрагментов кода, Adobe After Effects — для создания 2d видеороликов, Adobe Illustrator и Maxon Cinema 4d — для создания 3d роликов.

Политическая карта мира в настоящее время включает в себя более 200 стран, поэтому главная задача, которая решалась с помощью основной программы Microsoft Excel – присвоение значений из списка всех стран мира в списке стран, отмечаемых на разрабатываемой карте. Такое решение задачи обусловлено особенностью языка программирования action script 3.0: невозможно внедрить в код страны, которых нет на созданной карте.

Присвоение значений выполняется при помощи функции внутри Excel, ВПР. Порядок действий присвоения значений следующий: 1. Выбрать ячейку и написать=ВПР; 2. Выделить первую страну в списке, которой присваивается значение; 3. Выделить таблицу (из двух и более столбцов, один из которых содержит общий список стран, а другой - переносимые значения). Включение данных в таблицу должно быть регламентировано, для чего после каждого элемента необходимо поставить значок \$; 4. Записать номер колонки, содержащей данные, присваиваемые другой таблице; 5. Написать цифру «0» и закрыть скобки; 6. Растянуть функцию на весь список стран.

Создание «прокручиваемой» страницы – следующий необходимый этап. Эта технология в настоящее время хорошо разработана и в готовом виде представлена в [9].

Этап создания интерактивной карты длительный и трудоемкий, поэтому приведем лишь основные фрагменты кода и наиболее значимые шаги, обозначающие концепцию создания карты. Это предполагает выполнение следующих действий:

1. Используя программу Adobe Flash, трасируем (векторизуем) растровое изображение политической карты мира с границами стран:

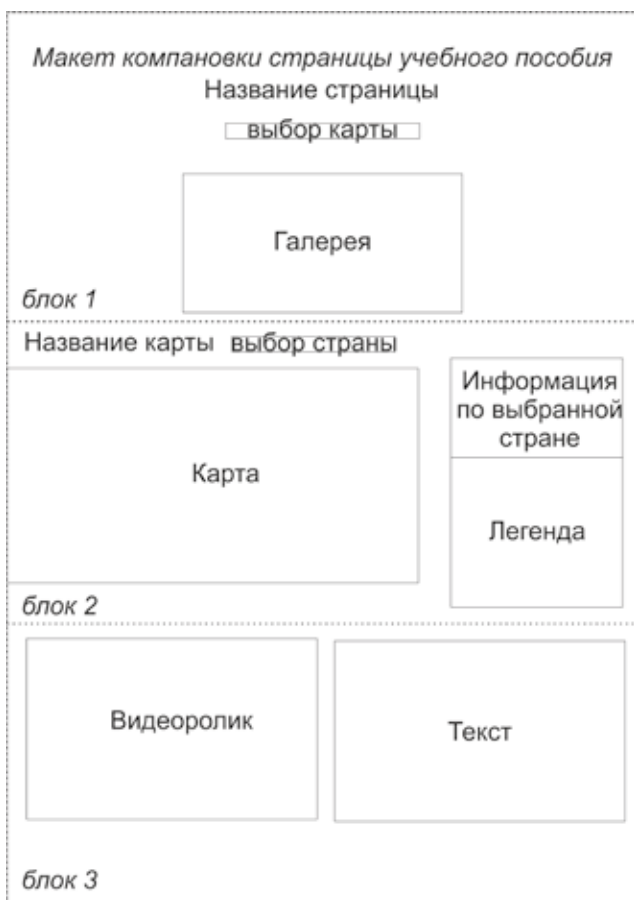


Рис. 2. Макет страницы электронного учебного пособия

модификация → растровое изображение → векторизация → пороговое значение 100, наименьшая область 8 пикс. → ок. происходит процесс трассировки изображения. Выбираем на изображении территорию нужной нам страны. Нажимаем клавишу F8 и преобразовываем выделенное изображение в символ. Задаем имя символа «Австралия», тип «Кнопка», нажимаем «Ок». Открываем панель свойств и задаем имя экземпляру «Австралия».

2. Дважды нажимаем на символ и входим в меню его редактирования. Снизу на временной шкале есть 4 кадра с названиями UP (состояние, когда кнопка не нажата), DOWN (состояние, когда кнопка нажата), OVER (состояние, когда курсор мыши наведен на кнопку), HIT (область отклика кнопки). Выбираем кадр UP и задаем стране цвет, соответствующий интенсивности явления в ней. Выбираем кадр OVER, выделяем страну, открываем панель свойств, и создаем для неё обводку серого цвета толщиной в 6 пунктов. В положении DOWN выделяем страну и в панели свойств выбираем серый цвет заливки. Выходим из меню редактирования символа (рис. 3).

3. Создаем при помощи инструмента «текст» прямоугольную область, далее открываем панель свойств и задаем имя экземпляра NazvanieStrani.

4. Создаем ещё одну прямоугольную область с помощью инструмента «текст» для того, чтобы в нём при нажатии на территорию страны появлялся нужный нам текст, и задаем ему имя countryinfo.

5. Прописываем код, при котором при наведении курсора на страну в текстовом фрейме будет отображаться её название (рис. 4).

```
Австралия.addEventListener(MouseEvent.CLICK,
countrytext);
function countrytext (event):void
{
    switch (event.currentTarget)
    {
        case Австралия :
            NazvanieStrani.text =
"Австралия";
            break;
    }
}
```

6. Прописываем код для того, чтобы при нажатии на контур страны в текстовом поле countryinfo появлялся текст (рис. 5).

```
Австралия.addEventListener(MouseEvent.CLICK,
countrytext);
function countrytext (event):void
{
    switch (event.currentTarget)
```



Рис. 3. Создание символа страны

```

{
case Австралия:
countryinfo.htmlText = текстАвстралия;
break;
}
}
var текстАвстралия:String = "Австралия в
стране положительный темп прироста населения
равный 1,17%"

```

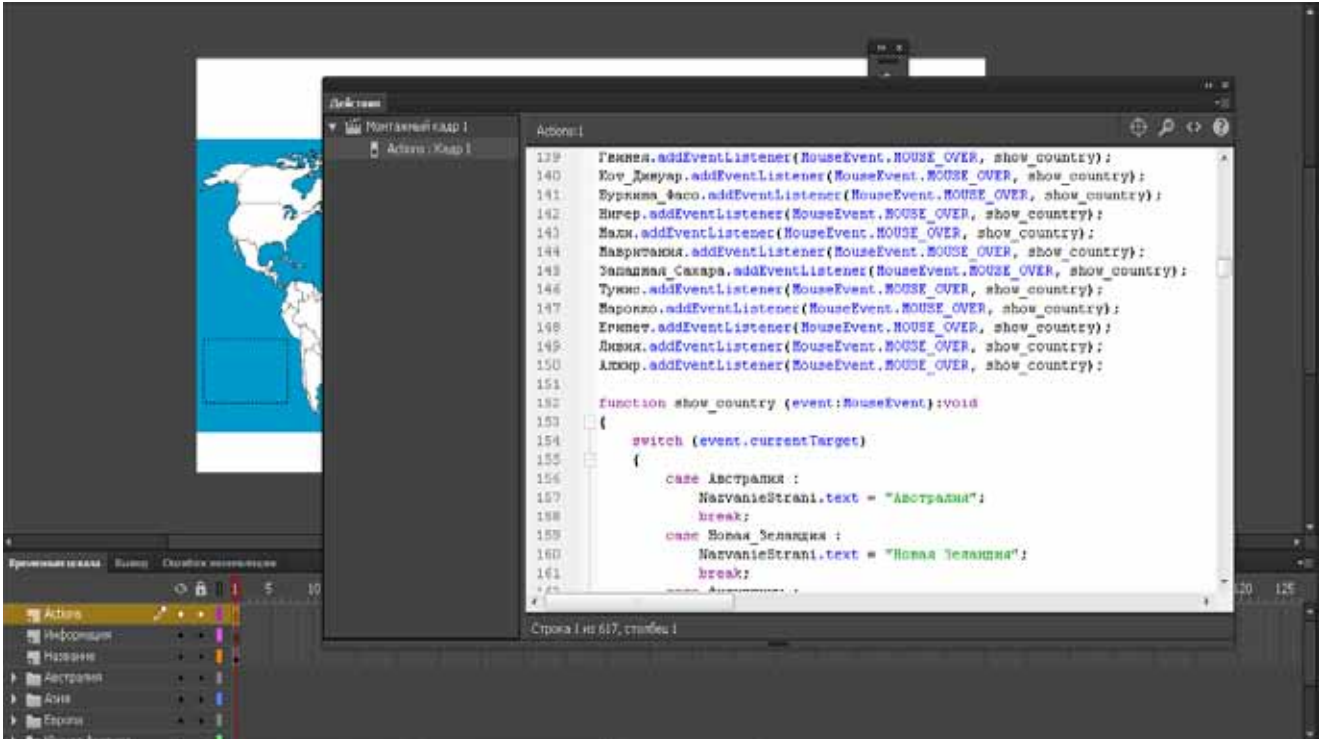


Рис. 4. Добавление кода для текстового поля с названием страны

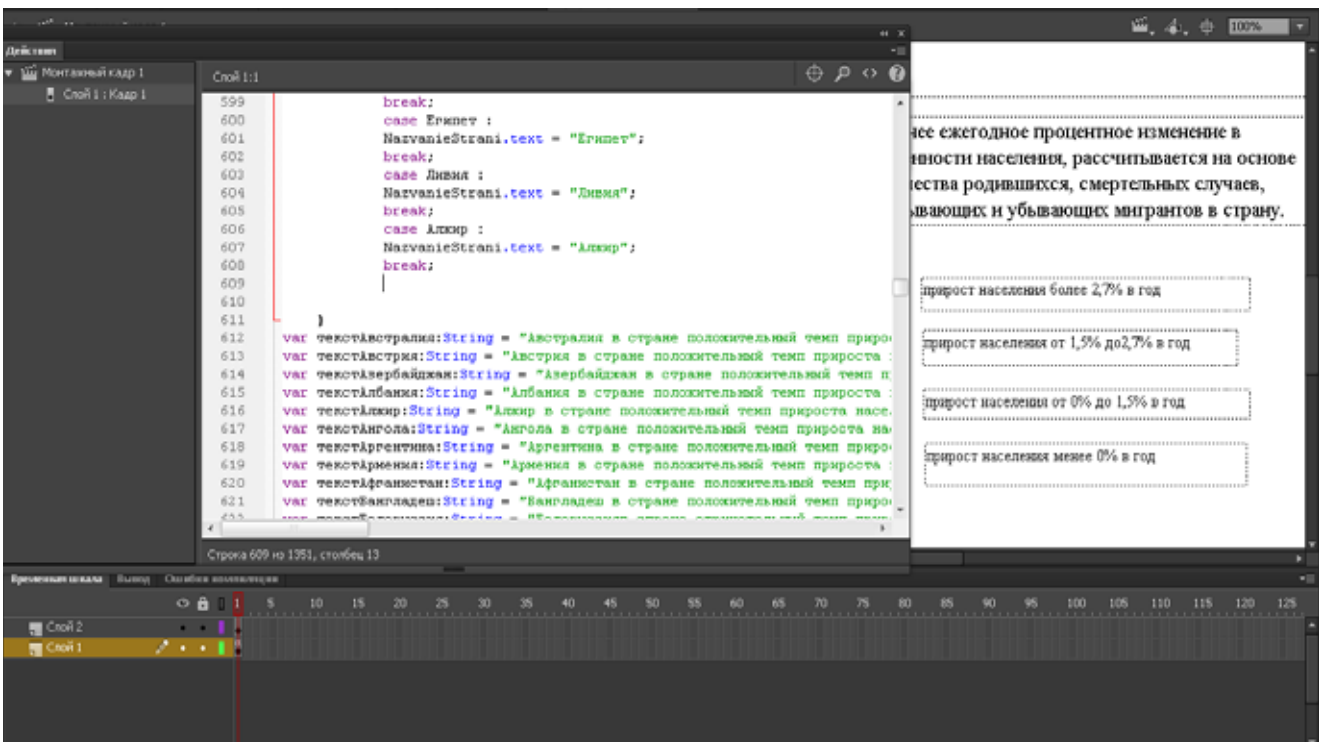


Рис. 5. Добавление кода для текстового поля с информацией о странах

7. В связи с тем, что на карте будет ещё около 150 стран, необходимо добавить компонент `combobox`, при нажатии на который появится список со всеми странами. Выбрав

одну из стран, мы опять получим интересующий нас текст в текстовом поле `countryinfo`. Открываем панель компоненты и переносим `combobox` в нужное место, например, чуть выше карты (рис. 6).

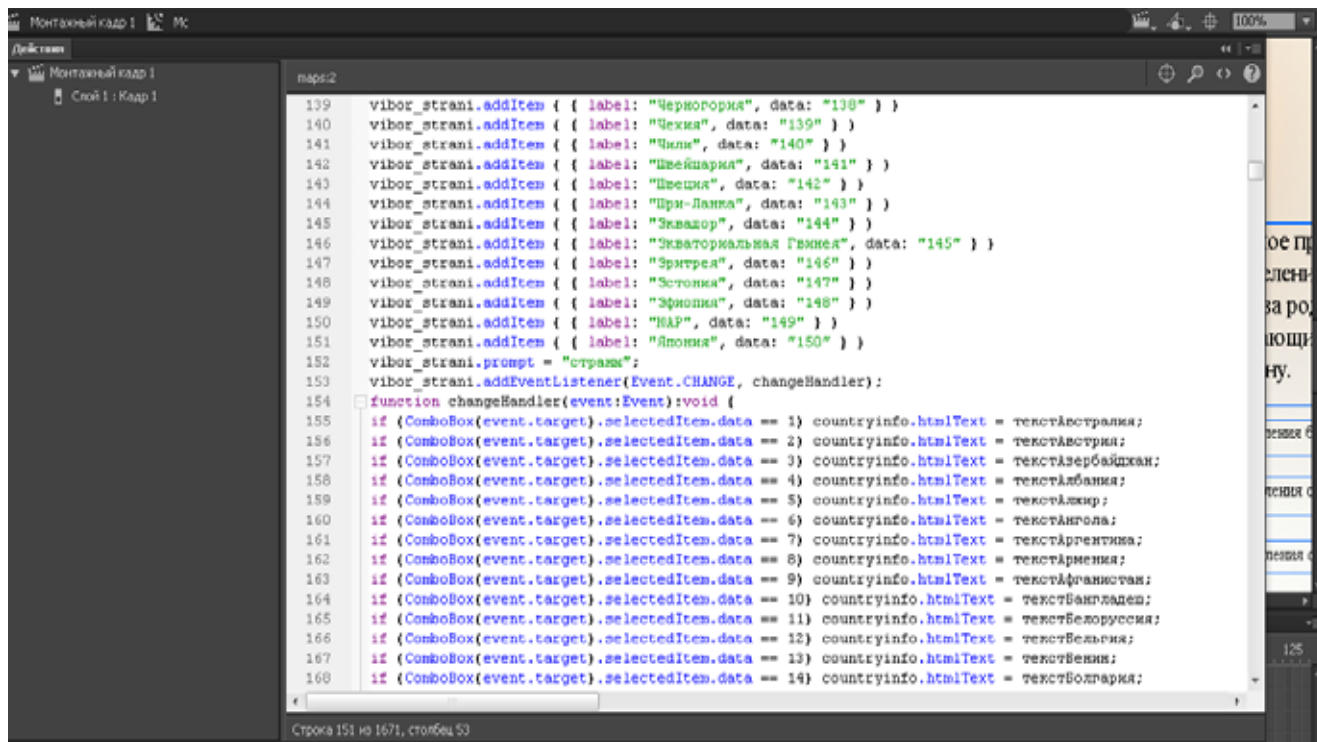


Рис. 6. Добавление кода для компонента `combobox`

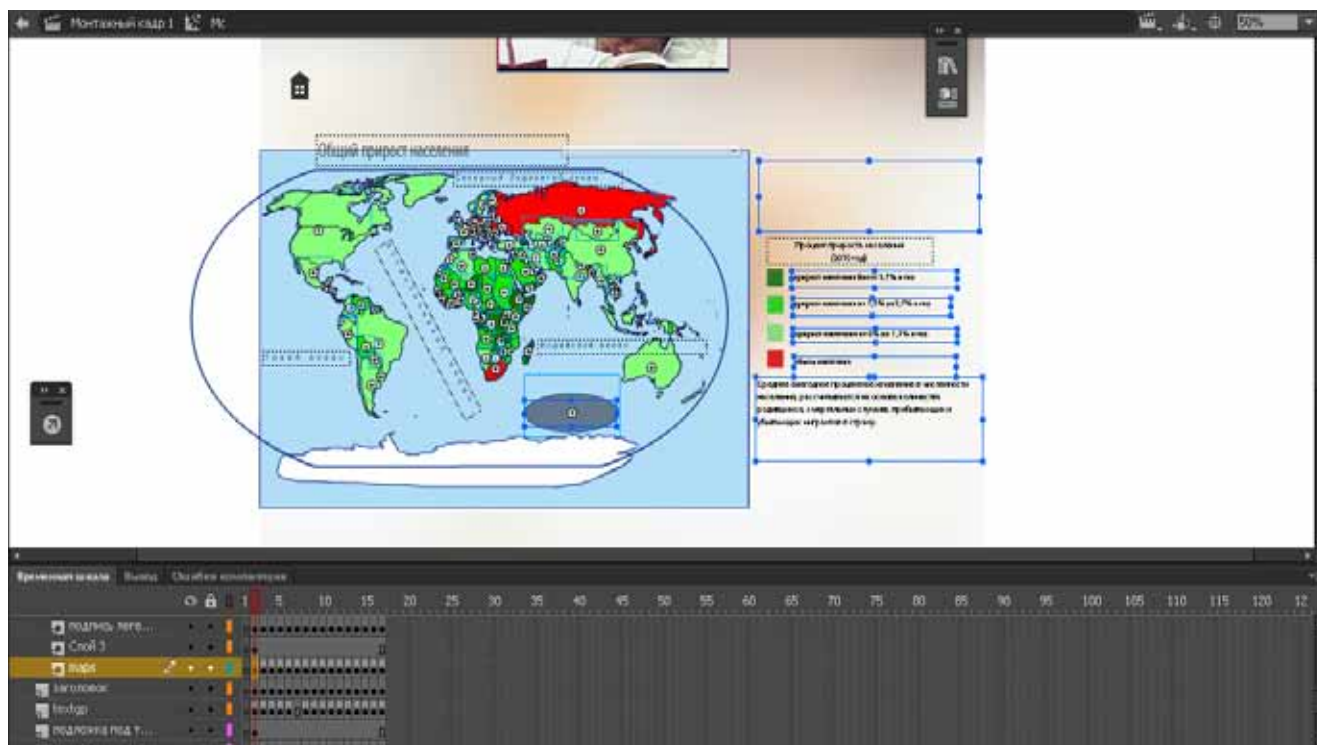


Рис. 7. Выделение элементов карты

Задаем имя экземпляру компонента `vibor_strani`. Прописываем код:
`vibor_strani.addItem ({ label: "Австралия", data: "1" })`
`vibor_strani.addEventListener (Event.CHANGE,`

`changeHandler);`
`function changeHandler (event:Event):void {`
`if (ComboBox(event.target).selectedItem.data == 1) countryinfo.htmlText = текстАвстралия;`
`}`

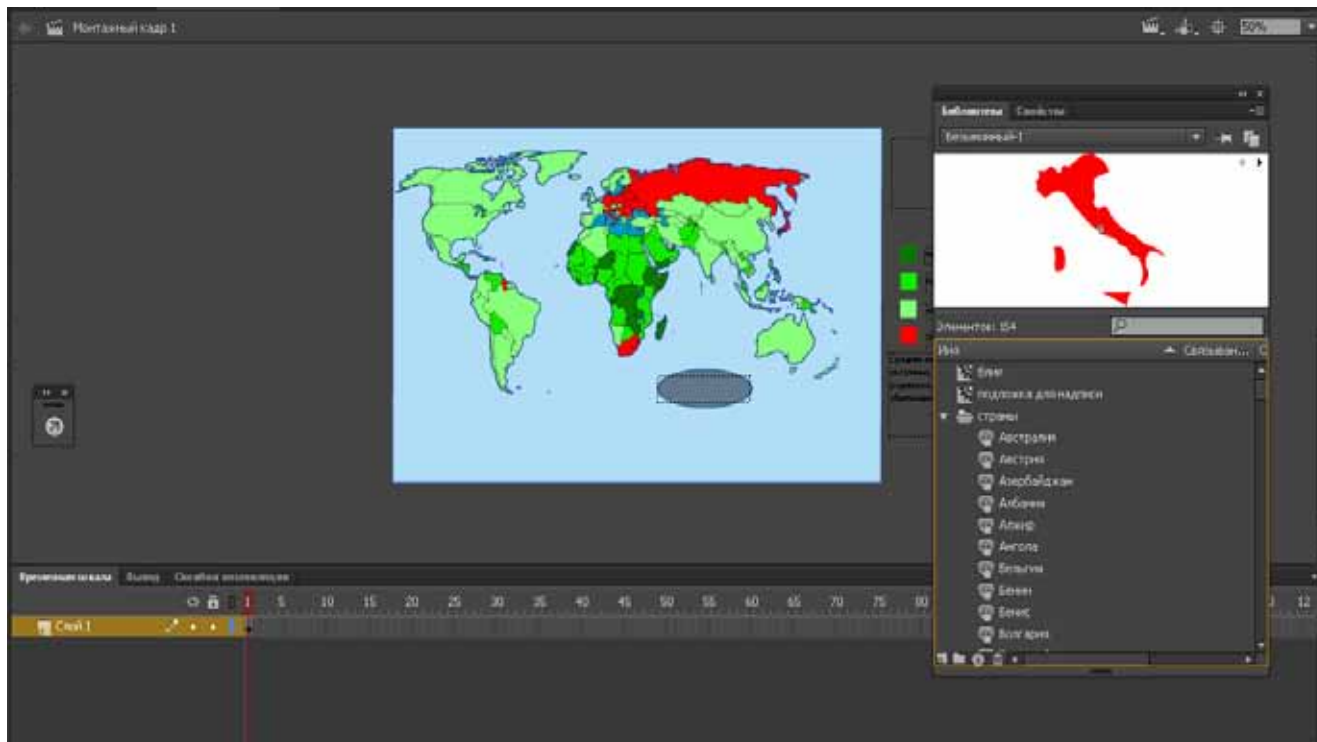


Рис. 8. Символы в библиотеке нового файла

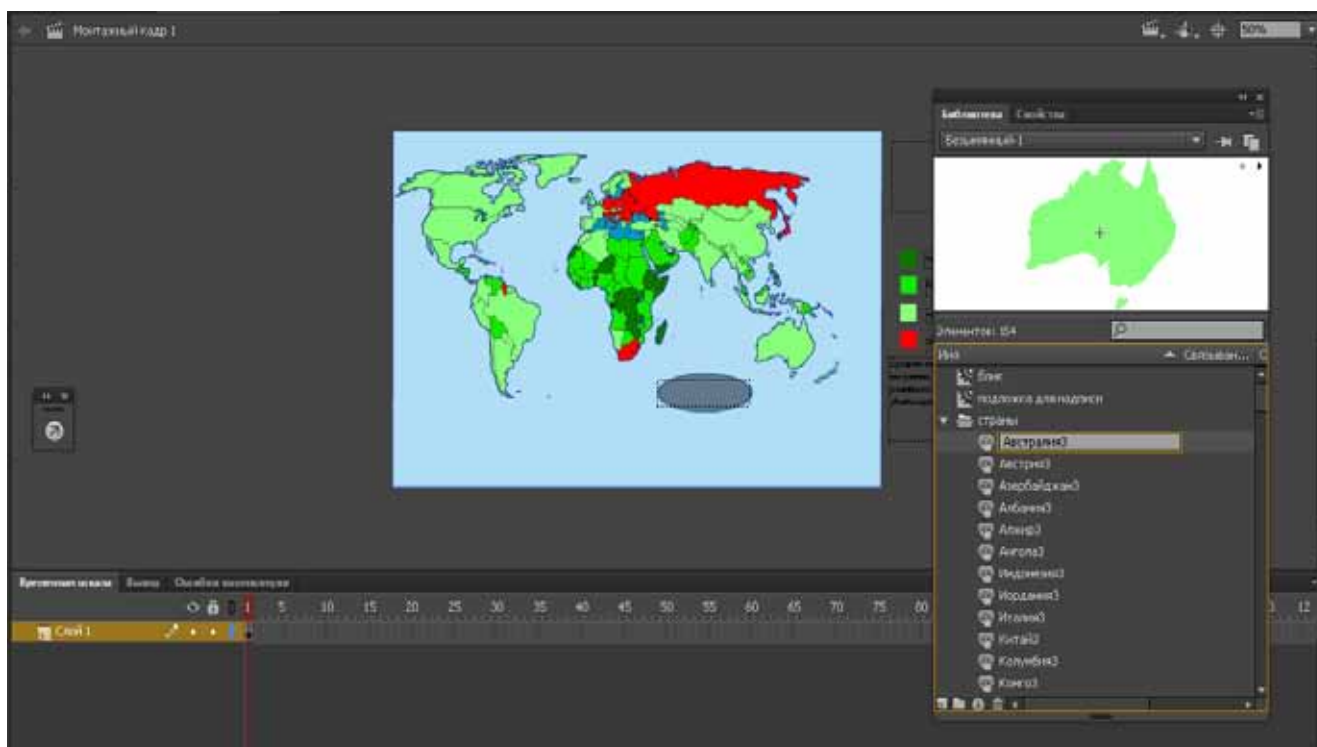


Рис. 9. Переименование символов

В результате создана страна-символ. Наводя курсор на него в текстовом окне «NazvanieStrani» появится слово «Австралия». При нажатии на это слово левой кнопкой мы-

ши в текстовом окне «countryinfo» появится текст «Австралия в стране положительный темп прироста населения равный 1,17%». Этот же текст получается при нажатии левой кноп-

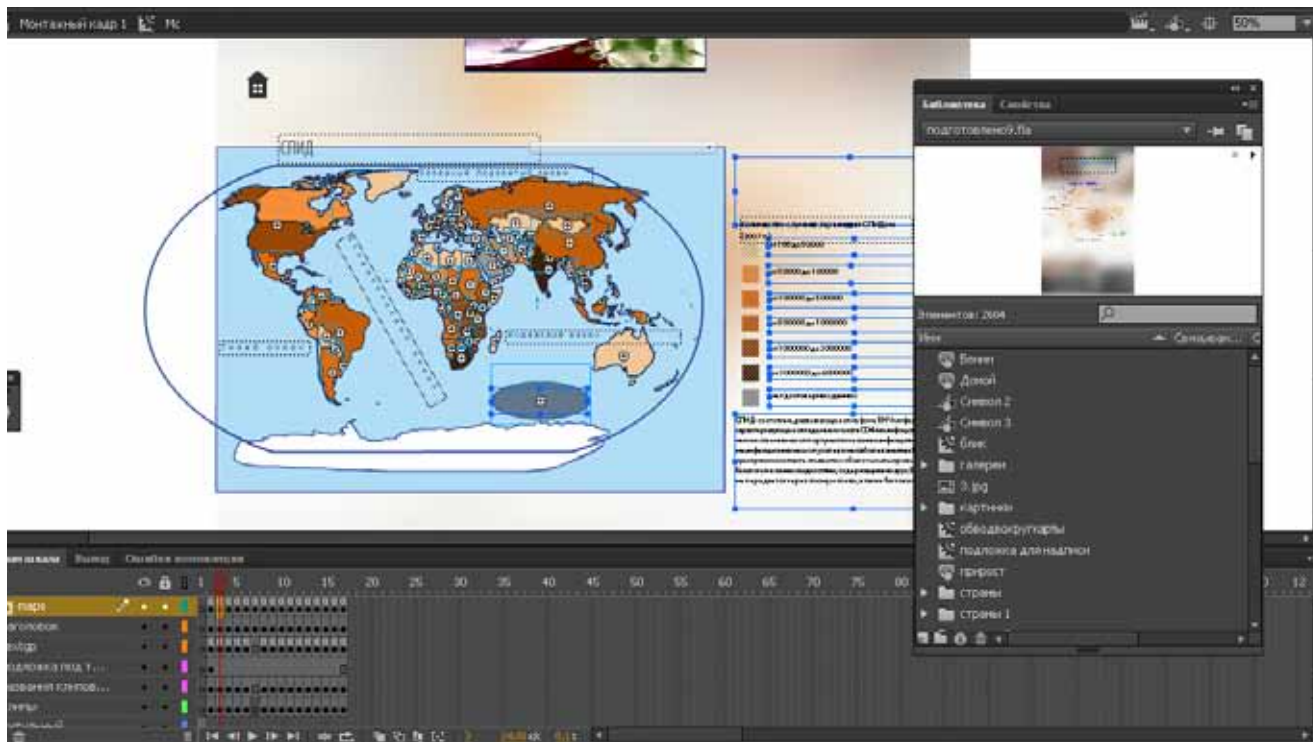


Рис. 10. Копирование карты на новый кадр

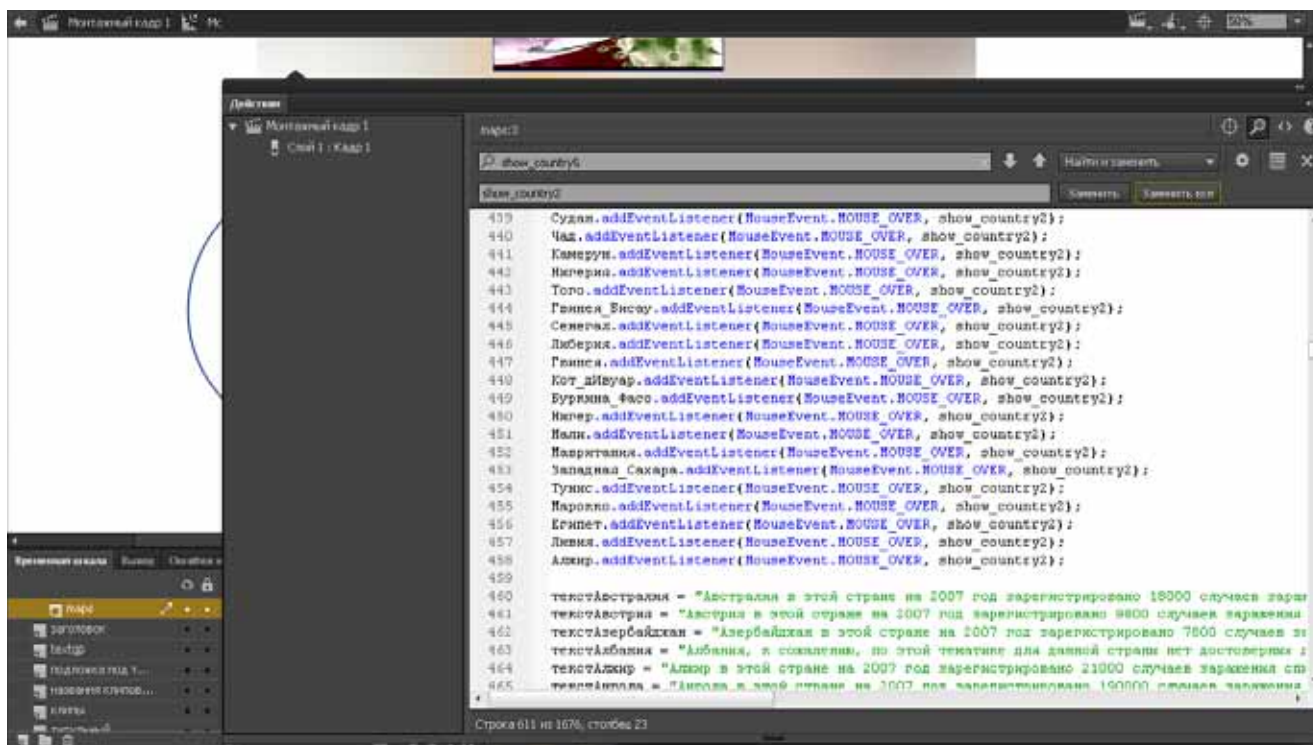


Рис. 11. фрагменты кода на второй карте

ки мыши на слово «Австралия» в компоненте `combobox`.

Подобная операция выполняется для стран, выбранных по критерию площади и экономической значимости.

Для создания второй страницы учебного пособия необходимо выполнить следующие действия:

1. Выделить все элементы интерактивной карты и скопировать их в новый документ при помощи комбинации клавиш `ctrl+shift+v`, чтобы карта в новом документе заняла те же координаты по оси x и y (рис. 7).

2. При копировании карты в новый документ в библиотеку автоматически переносятся все символы, в том числе и страны. Их следует переименовать для того, чтобы задать новый цвет символам на следующих страницах учебного пособия (рис. 8, 9).

3. Теперь странам можно задать новый цвет в соответствии с новыми статистическими данными. Все элементы карты копируются и вставляются на следующий кадр в учебном пособии (рис. 10).

4. Следует переименовать функции для того, чтобы интерактивные элементы работали так же, как и на первой карте (на примере Австралии) (рис. 11):

```
Австралия.addEventListener(MouseEvent.CLICK, show_country5);
текстАвстралия = "Австралия в этой стране на
2007 год зарегистрировано 18000 случаев заражения
спидом"
function show_country2
(event:MouseEvent):void
{
    switch (event.currentTarget)
    {
        case Австралия :
            НазваниеСтраны.text =
"Австралия";
            break;
    }
}
function countrytext (event):void
{
    switch (event.currentTarget)
    {
        case Австралия:
            countryinfo.htmlText = текстАвстралия;
            break;
    }
}
```

5. Для остальных карт следует повторить данный алгоритм.

6. Переход между картами осуществляется при помощи компонента `combobox` или по-

средством кнопки на странице карты, позволяющей листать страницы.

Глобальные проблемы – сложное явление, требующее для своего осмысления знаний многих дисциплин: философии, экономики, международного права и пр. Глобальные проблемы имеют как социоприродную сущность, так и политэкономическую, связанную со сменой формаций. Изложение этой проблематики в виде учебного пособия для учащихся средних учебных заведений требует особого подхода, а именно облегченной и доступной подачи материала с использованием современных наглядных средств изложения.

Подготовленное учебное пособие, разумеется, не может претендовать на всеобъемлющее и детализированное изложение проблематики, и это не входило в круг задач разработчиков. В то же время пособие, как не имеющее аналогов, может быть востребовано в процессе обучения учащихся, нуждающихся в такого рода учебных материалах. Внедрение подобной методики, как представляется, позволит создать условия для углубленного изучения учебного материала учащимися с помощью более активного использования так называемой обратной связи.

Несомненно, работа в этом направлении может и должна быть продолжена с целью совершенствования методов подачи материала с использованием всего имеющегося в настоящее время компьютерного инструментария.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Максаковский В.П.* Экономическая и социальная география мира. 10 кл. М.: Дрофа, 2010.
2. *Загладин В.В., Фролов И.Т.* Глобальные проблемы современности: научный и социальный аспекты. –М., 1981. – 240 с.
3. *Кузнецов А.П., Ким Э.В.* География. 10–11 классы. Базовый уровень. 2-е изд., пересмотр. – М.: Дрофа. – 2011. – 368 с.
4. *Домогацких Е.М., Алексеевский Н.И.* География: Региональная характеристика мира. 10–11 класс. Часть 2. –М.: Дрофа.
5. Русское географическое общество: [Электронный ресурс]. М., 2013-2016. URL: <http://www.rgo.ru> (Дата обращения: 15.08.2013).
6. Портал «География»: [Электронный ресурс]. М., 2007-2016. URL: <http://www.webgeo.ru>
7. Географический образовательный портал: [Электронный ресурс]. М., 2009-2016. URL: <http://mygeog.ru> (Дата обращения: 15.08.2013).
8. *The world bank*: [Электронный ресурс]. NW Washington, 2004-2016. URL: <http://worldbank.org>. (Дата обращения: 15.08.2013).
9. *Admin.* ScrollBar на ActionScript 3.0://edapskov.ru. 2011. URL: <http://edapskov.ru/pages.php?id=74>. (Дата обращения: 20.04.2013).

Принята к печати 21 июня 2016 г.
Рекомендована кафедрой географии МИИГАиК

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

СТРОЕНИЕ ГРАДАНОВ С АКСИАЛЬНОЙ ФОРМОЙ РАСПЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

©2016 Н.Н. Попов¹, А.С. Филонов¹, Г.А. Донцов², Д.А. Сагалаев¹, Д.С. Афанасов¹

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

²ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Россия

dontsov@zenit-kmz.ru, kafedra-po@yandex.ru

Аннотация. Представлены элементы технологии производства, мезо- и микроскопическая структура граданов-трансляторов отечественного производства с аксиальной формой распределения показателя преломления, а также фрактография образцов при внешнем возмущающем воздействии. Работа является одной из первых в отечественной литературе в области исследования влияния технологических неоднородностей строения граданов, оказывающих негативное воздействие на уровень физико-химических и механических свойств образцов градиентной оптики. Показан вид экспериментально обнаруженных поверхностных и подповерхностных микро- и мезоструктурных дефектов строения граданов, оказывающих влияние на увеличение рассеяния апертурных лучей и снижение коэффициента пропускания стекла для образцов с плоскими рабочими поверхностями.

Ключевые слова: функциональный материал, анизотропия свойств, микро- и мезоструктура, фрактография поверхности, дефекты строения

GRADANS WHICH HAVE AXIAL FORM OF GRADED REFRACTIVE INDEX

©2016 Popov N.¹, Filonov A.¹, Dontsov G.², Sagalaev D.¹, Afanasov D.¹

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

²JSC «Krasnogorsky Zavod» (KMZ «ZENIT»), Russia

kafedra-po@yandex.ru, g.dontsov@zenit-kmz.ru

Abstract. Elements of producing technology and meso- and microscopic structure of domestically produced gradans-compilers with axial shape of refractive index, as well as fractography samples at external perturbations are introduced. This work is among the first in Soviet literature concerning the influence of technological structure inhomogeneities gradans that adversely affect the level of physical, chemical and mechanical properties of gradient optics samples. Types of mesostructural, surface and subsurface defects on difference- and micro-structure gradans affecting the increase in aperture ray scattering and reduced transmittance glass for samples with flat working surfaces have been observed experimentally.

Keywords: functional material, anisotropy properties, micro- and mesostructure, fractography surface, structure defects

Градиентная оптика является одним из перспективных направлений развития оптических приборов и систем. Наибольшее распространение получили граданы — миниатюрные градиентные оптические элементы из специальных стекол с различным распределением показателя преломления (РПП) — аксиальным, радиальным и сферическим. Они широко применяются в оптических системах волоконной

оптической связи, различных волоконных лазерных системах, устройствах лазерной резки и сварки и т.д. Градиентные стёкла с аксиальным РПП применяются для исправления аберраций в сложных оптических системах или для уменьшения количества компонентов, применение которых уменьшает габаритно-весовые характеристики. Классические методы получения образцов стекла с градиентом физико-хи-

мических свойств в виде зонной плавки шихты переменного состава, синтеза из паровой фазы, рентгеновского и нейтронного облучений, закалки и ионообменной диффузии таллий-калиевой и литий-натриевой систем элементов известны давно [1]. Перспективный и эффективный метод получения стекол с переменным показателем преломления (ПП) отсутствие силы тяжести в условиях космического пространства или высокотемпературные центробежные методы. К настоящему времени предпочтение в формировании градиентных оптических сред по величине изменений ПП отдаётся саморегулирующимся физико-химической природой процессам ионообменной диффузии, которые подчиняются термодинамическим закономерностям. Ионный обмен производится как в системах, состоящих из стекла и расплавленной соли, так и в системе, состоящей из стекол различного химического (минерального) состава, находящихся в контакте в интервале температур размягчения. Для задач оплотехники необходимо изменять свойства стекла на глубину в несколько миллиметров. Эффективное изменение ПП зависит от вида стеклообразующей основы стекла [2].

В настоящее время наиболее широко применяется метод ионообменной диффузии, который удовлетворяет требованиям серийно-массовой технологии производства графанов, позволяя одновременно обрабатывать большие партии заготовок, реально создавая условия для хорошей воспроизводимости экспериментальных результатов от партии к партии, контролировать заданное значение РПП посредством изменения состава солевого расплава и температуры ионообменной обработки [3]. Сущность ионообменной обработки состоит в том, что цилиндрической формы образец длиной до 500 мм из стекла, содержащего ионообразующие химические элементы, при определённой температуре, обеспечивающей необходимую вязкость ($\approx 10^9$ – 10^{10} пуаз), помещается в расплавленные соли, в которых ионы стекла замещаются на ионы расплава соли. Перспективными составами стекол для ионного обмена образцов графанов с аксиальной и радиальной формами РПП считаются системы: натриевое стекло-литиевый расплав; натриевое стекло-расплав с ионами серебра;

таллиевое стекло-калиевый расплав; литиевое стекло-калиевый расплав и др. [1,2].

К настоящему времени наиболее массовой является высокотемпературная ионообменная диффузия между специальными стёклами, содержащими таллий и литий, и расплавами солей калия и натрия. Производится несколько миллионов цилиндрической формы графанов «Селфок» в год для волоконно-оптических линий связи и сканирующих объективов портативных копировальных аппаратов. Вторым типом промышленной технологии является интердиффузия, представляющая спекание и последующее диффузионное заглаживание слоев специально подобранных стекол с осевым градиентом ПП, которая перспективна для получения величин перепадов ПП, недостижимых при использовании технологии ионного обмена.

В настоящей работе для цилиндрических образцов графанов-трансляторов применялся метод низкотемпературной ионообменной диффузии в среде азотнокислого калия с поверхностным диффузионным светопоглощающим слоем, необходимом для гашения внеапертурных лучей. При ионообменной диффузии возникает градиент концентрации обменных катионов, что приводит к изменению механических, спектральных и электрических свойств материала. Вследствие концентрационных изменений возникают не только механические напряжения, но и структурная релаксация в диффузионном слое. При ионообмене литиевое стекло - натриевый расплав ПП в обменном слое уменьшается, а при обратной замене – увеличивается [1]. Ионообменная диффузия в системе стекло - расплав солей происходит под действием градиента электрохимического потенциала, в котором, помимо градиента концентрации ионов, учитывается градиент потенциала электрического поля, возникающего локально по причине разной подвижности ионов, участвующих в обмене. Вследствие различных размеров обменных катионов в стекле создаются значительные напряжения, которые медленно релаксируют [1]. В процессе релаксации изменяется структура стекла и подвижность ионов, а после полной релаксации напряжений подвижность ионов оказываются такими же, как в аналогичных

стёклах, сваренных обычными методами [1]. В случае ионного обмена при пониженных температурах, в структуре стекла релаксация не происходит. Чем больше различие в размерах обменных катионов, степень замены ионов, разница в коэффициентах термического расширения исходного и изменённого стекла, тем сильнее сказывается влияние механических напряжений и релаксации структуры в обменном слое не только на механическую прочность градиентного образца, но и на профиль ПП, и геометрическую форму, и размеры образцов, определяемые уровнем напряжений в диффузионном слое. Например, вклад, вносимый напряжениями в полное радиальное изменение ПП, для силикатных стекол при обмене «литиевое стекло-натриевый расплав» составляет 2–6%, а при обмене «натриевое стекло-калиевый расплав» 30–50%. В соответствии с [1] первоначальным источником изменения геометрической формы и размеров образцов граданов является химический (минеральный) состав исходного шихтового материала стекла и состав ионообменного расплава. Изменение формы и геометрических размеров образцов возможны и в процессе последующих технологических режимов спекания стекломассы — это уровень температуры и длительность диффузионных процессов создания ионообменного слоя, обеспечивающего изменение ПП, и окислительно-восстановительного процесса создания внешнего светопоглощающего слоя, а также уровень остаточных внутренних напряжений в диффузионных слоях [3].

Основные термодинамические закономерности формирования градиентных оптических сред методами ионообменной диффузии являются общими при создании элементов макро-, микро- и интегральной оптики. Основные различия связаны с глубиной протекания релаксационных процессов [1]. Ни одна область оптического приборостроения не остаётся в стороне от использования возможностей управления оптическими характеристиками материалов: показателем преломления, дисперсией, двулучепреломлением и др.

Объектом настоящего экспериментального исследования служили цилиндрические образцы граданов с аксиальной формой РПП (трансляторы) свинцово-силикатного ряда

отечественного производства, диаметр которых составлял 1,0 ... 1,5 мм; 2,0 мм и длиной 58...92 мм. Образцы граданов-трансляторов малых диаметров имели в состоянии поставки тёмный непрозрачный поверхностный светопоглощающий слой, а рабочий образец градана диаметром 2,0 мм, предназначенный для комплектации технического эндоскопа, имел прозрачное поверхностное светопоглощающее покрытие (рис. 1). На плоских торцевых входной и выходной поверхностях некоторых граданов имелось защитное нанопокрытие из двуокиси титана и кремния толщиной 150 нм. Образцы граданов подвергались исследованиям торцевых рабочих и боковых цилиндрических поверхностей на оптических микроскопах моделей МБС-10, МИМ-7 при экстремальных увеличениях 1...200 крат и универсальном измерительном — УИМ-21 для определения мезо-, микроскопического строения и габаритных размеров. На рабочих плоских поверхностях граданов-трансляторов обнаруживается наличие включений двух типов — светлые сферической формы со средним диаметром 2...7 мкм и тёмные частицы неопределённой шлаковидной конфигурации. Светлые включения сферической формы представляют собой следы от конденсата влаги, образовавшиеся при транспортировке образцов в условиях переменной относительной влажности атмосферного воздуха. Внутри светлых включений

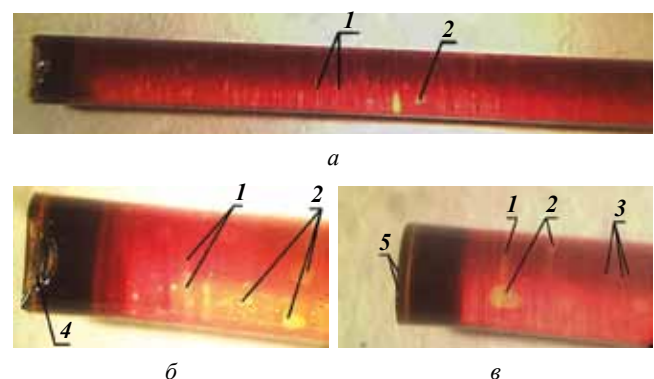


Рис. 1. Внешний вид градана-транслятора с аксиальной формой РПП:

a, б — со стороны выходной плоскости (*a* — 6^х; *б* — 22^х); *в* — со стороны входной плоскости; 1 — поперечные ликвационные мезодефекты строения; 2 — подповерхностные пузыри; 3 — поверхностные раковины; 4 — сложная поверхность разрушения градана; 5 — микроскопические сколы на полупериферии входной части рабочей поверхности градана (увеличение — 22^х)

округлой формы отмечаются концентрические частицы сферической формы светлой окраски, но меньшего диаметра — 1...3 мкм. Эти включения удаляются в процессе легкого сухого полирования рабочих поверхностей графанов.

На периферии окружности торцев рабочих поверхностей графанов отмечаются темные пилообразные остроугольные фигуры размером 5...7 мкм, размещающиеся на одной полуокружности периферии рабочей плоскости, что однозначно свидетельствует о высокой хрупкости стекла, обнаруживаемой при выполнении разделительных технологических операций конкретного графана от первоначальной более длинной исходной заготовки. Боковая цилиндрическая поверхность образцов диаметром 1,0...1,5 мм имеет ярко выраженную шероховатость поверхности с наличием впадин глубиной 5...12 мкм. Общая окраска боковой поверхности графанов имеет тёмно-коричневый цвет. При исследовании боковой цилиндрической поверхности графанов диаметром 1,0...1,5 мм с увеличением $200\times$ (микроскоп МИМ-7) в тёмном поле обнаруживаются многочисленные, равномерно распределённые округлые кратеры-раковины со средним диаметром 10 ± 2 мкм, причём донная часть конусообразных кратеров-раковин имеет блестящий вид, а промежуточные тёмные участки представляют собой возвышения. Отдельные единичные кратеры-раковины достигают глубину до 30...35 мкм.

Экспериментальный мезо- и микроскопический анализы строения графанов отмечают наличие градиента локальных значений электрохимического потенциала в образцах с аксиальной и радиальной формами РПП вследствие различия концентрации ионов в ионообменном приповерхностном слое, ответственном за получение значений градиента РПП, и локальных градиентов электрохимического потенциала вследствие различной диффузионной подвижности ионов, участвующих в ионообменном процессе. В образцах графанов с аксиальной формой РПП градиент значений электрохимического потенциала обнаруживается как в образцах по их длине, так и в радиальном направлении поперечного сечения на входной и выходной рабочих плоскостях графанов. Градиент значений электрохи-

мического потенциала в процессе проведения мезо- и микроскопического анализов образцов графанов с аксиальной и радиальной формами РПП определялся по интенсивности притяжения инородных атмосферных органических частиц к рабочим поверхностям, многие из которых располагались на периферии и даже за пределами площадей рабочих поверхностей графанов, декорируя периферийные участки ионообменного слоя. Градиент значений электрохимического потенциала графанов с ионообменным приповерхностным слоем приводит к анизотропии адгезии окружающих пылевидных частиц из атмосферы, в которой проводятся исследования. Аналогичный механизм декорирования локальных участков структуры нано- и микрочастицами обнаруживается при химическом травлении гетерогенным реактивом металлографических шлифов в местах расположения атомно-кристаллических линейных дефектов строения — дислокаций в поликристаллических сплавах [4]. Единичные дислокации в кристаллических материалах, имея поперечный размер около 1 нм, также отличаются наличием электростатического потенциала и могут быть обнаружены на доступных и широко распространенных отечественных оптических микроскопах типа МИМ-7, -8, работающих с максимально возможным увеличением элементов структуры материалов до $1300\text{--}2000\times$. Для определения градиента распределения ионообменной концентрации, которая определяет форму РПП графанов, методом декорирования инородными однородными по геометрическим размерам и массе нано- и микрочастицами, необходимо экспериментально подобрать соответствующую инертную для стекла электролитическую среду, вид, размер распределённых в ней декорирующих частиц и время выдержки в электролите. Наиболее перспективной указанная методика декорирования градиента концентрации ионов представляется для исследования структуры рабочих поверхностей графанов с радиальной формой РПП, поскольку в поле зрения микроскопа может попасть одновременно значительная часть градиентного приповерхностного диффузионного слоя с различной концентрацией диффузанта. Однако для этих целей возможно применять микроскопы с меньшей разрешающей способностью типа МБС-10.

Представленные выше результаты микроскопических экспериментальных исследований строения граданов-трансляторов диаметром 1,0...1,5 мм с аксиальной формой РПП, имеющих непрозрачный поверхностный светопоглощающий слой, необходимый для гашения внеапертурных лучей, представляют не полную информацию о внутреннем структурном состоянии образцов.

На рис. 1 представлен вид строения рабочего градана-транслятора диаметром 2,0 мм с прозрачным поверхностным светопоглощающим слоем. На рис. 1, *а* фокусирование микроскопа модели МБС-10 производилось на подповерхностную цилиндрическую часть, обнаруживающую многочисленные поперечные длине образца дефекты строения ликвационного происхождения, которые не могут не увеличивать степень рассеяния рабочих лучей [5, 6]. На рис. 1, *а, б* представлена выходная рабочая поверхность градана, имеющая скол, свидетельствующий об отделении данного рабочего образца от первоначальной длинной заготовки методом изгиба до разрушения с малым расстоянием между опорами. Фрактография первоначальной поверхности разрушения имеет вид плоской поверхности, начало разрушения по которой произошло от наличия в локальном месте мезодефекта — ликвационного расслоения. Начало разрушения происходило перпендикулярно общей длине образца вследствие наличия микрорасслоения из-за различия значений химического (минерального) состава и плотности компонентов — фаз. Характерным фактом морфологии поверхности разрушения методом локального изгиба от внешнеприложенных напряжений, является разворот первоначальной плоскости разрушения под углом в зоне наличия диффузионного ионообменного слоя, а затем повторный поворот направления разрушения в зоне наличия светопоглощающего поверхностного слоя (рис. 2, 3). Анизотропия механических свойств материала в поперечном сечении образца приходится на локальные места наличия ионообменного диффузионного слоя и светопоглощающего слоя, а поэтому является реальной причиной двойного поворота направлений разрушения на выходной поверхности градана. На удалении 0,5 мм от начала плоскости разрушения градана наблюдается

скопление ликвационных деформационно-сдвиговых поперечных мезодефектов строения искусственного происхождения, выходящих на боковую цилиндрическую поверхность образца и значительно бликующих при изменении положения источника излучения микроскопа МБС-10. Искусственные ликвационные деформационно-сдвиговые дефекты градана образуют на поверхности разрушения ступенчатую структуру. Светопоглощающий поверхностный слой прозрачен для лучей видимой части спектра, что позволяет обнаруживать под-поверхностные поперечные длине образца ликвационные мезодефекты строения и пузыри по всей длине градана-транслятора, в отличие от других образцов трансляторов с непрозрачным светопоглощающим слоем, диаметр которых, в среднем, составляет 2,4...1,45 мм, что соответствует категориям пузырьности 7...8 по ГОСТ 3514-76.

Исследование строения боковой цилиндрической поверхности градана-транслятора на микроскопе МБС-10 выполнялось путём помещения образца либо непосредственно на предметный столик микроскопа, либо установкой образца в четырехкулачковый цанговый патрон, а затем на призменную У-образную стальную подставку. Наблюдение проводилось при фокусировке микроскопа на поверхность и подповерхностную часть образца, а отсчёт расстояний производился от входной бездефектной рабочей плоскости градана. При экспериментальном исследовании строения боковой поверхности образца отмечаются следующие факты, некоторые из которых сфотографировать не представилось возможным. На расстоянии 0,1 мм от плоского входного торца образца отмечается наличие изогнутого во внутрь образца широкого светящегося поперечного мезодефекта строения, состоящего из шести тонких полос. Не исключена возможность происхождения изогнутости дефекта вследствие технологических операций отделения образца от большой исходной заготовки с последующим шлифованием и полированием рабочей плоскости торца образца. На удалении от рабочей плоскости градана менее 0,5 мм отмечается наличие трёх тонких поперечных мезодефектов строения на верхней части боковой цилиндрической поверхности.

На удалении более 0,5...0,6 мм от рабочей плоскости виден широкий мезодефект, после которого следуют ещё четыре тонких мезодефекта. На расстоянии 1...2 мм видны два широких мезодефекта, причём их толщина увеличивается к центру верхней боковой поверхности образующей цилиндра. На расстоянии больше 5 мм от торца образца обнаруживаются разновысокие дефекты (шероховатость) поверхности типа – «углубление-бугристость», высоту которых определить не представилось возможным. Обилие ликвационных деформационно-сдвиговых поперечных мезодефектов строения градана-транслятора хорошо видно на рис. 1, *а* при малом увеличении (позиция 1). На рис. 1, *б* фокусирование микроскопа произ-

водилось на подповерхностные дефекты типа округлых и эллипсовидных пузырей, имеющих максимальные размеры от 0,1 до 0,4 мм, что соответствует 2...5 категориям пузырьности по ГОСТ 3514-76. Эти подповерхностные пузыри имеют различную степень светлой окраски, по-видимому, вследствие различной удалённости их от поверхности образца. Наиболее вероятной причиной их образования может быть выделение и скопление газов при технологической операции спекания исходного шихтового стекла. На рис. 1, *в* видны ликвационные поперечные мезодефекты строения (позиция 1), подповерхностный пузырь эллипсовидной формы (позиция 2), имеющий размер около 0,5 мм пятой категории пузырьности по ГОСТ 3514-76, и мелкие поверхностные раковины (позиция 3) величиной менее 0,1 мм. Вместе с тем (рис. 1, позиция 5), на периметре входной рабочей плоскости транслятора видны небольшие хрупкие сколы, величиной менее 0,05 мм, образовавшиеся только на периферии одной полуокружности в результате, по-видимому, выхода разделительного инструмента или в результате взаимодействия со шлифующим абразивом относительно большой фракционности.

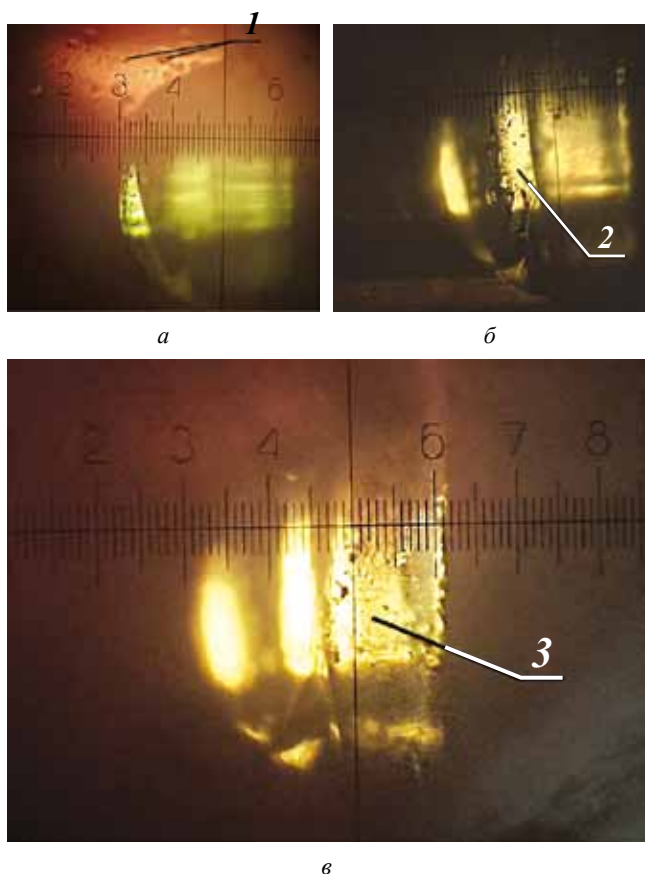


Рис. 2. Вид ступенчатых поверхностей разрушения со стороны выходной плоскости градана-транслятора с аксиальной формой РПП:

а — фокусировка микроскопа на плоскость разрушения, прилегающую к боковой цилиндрической поверхности градана; *б* — фокусировка микроскопа на среднюю плоскость разрушения; *в* — фокусировка микроскопа на основную плоскость разрушения; 1 — раковины на боковой цилиндрической поверхности градана; 2 — неоднородность строения низкотемпературного ионообменного слоя; 3 — неоднородность основной плоскости разрушения градана (увеличение — 60^х)

На рис. 2 представлена торцевая фрактография двухступенчатой поверхности разрушения образца транслятора, выполненная при помощи микроскопа модели МИМ-7 в тёмном поле. На рис. 2, *а* показана поверхность разрушения, прилегающая к боковой цилиндрической поверхности градана-транслятора. Характер разрушения свидетельствует о наличии светопоглощающего слоя, имеющего большие значения параметров пластичности по сравнению с основой стекла. На рис. 2, позиция 2 видна зона разрушения большого по толщине диффузионного ионообменного слоя величиной около 1,0 мм в виде плоскости с наличием радиуса закругления, прилегающего к началу светопоглощающего слоя. Эта зона разрушения по низкотемпературному диффузионному ионообменному слою имеет неоднородность строения, объясняющуюся неоднородностью химического состава по глубине поперечного сечения градана-транслятора. Рис. 2, позиция 3 показывает вид первоначальной основной плоскости разрушения градана, но эта плоскость

расположена под углом к основной фокусной плоскости (фронтальной плоскости) объектива микроскопа, т.е. при неперпендикулярной постановке к фронтальной линзе объектива. Как следует из данных, представленных на рис. 2, позиция 3, основная начальная плоскость разрушения транслятора обнаруживает некоторую шероховатость поверхности и наличие инородных частиц, притягивающихся к ней вследствие существования градиента значений электрохимического потенциала в поперечном сечении образца.

На рис. 3 представлена мезоструктура части градана-транслятора со стороны выходной рабочей поверхности с видом несовершенств поверхностного и подповерхностного строения, которые рассматривались выше, а также видом трёх поверхностей разрушения — основной рабочей выходной поверхности (позиция 1), области разрушения по низкотемпературному диффузионному ионообменному слою (позиция 2) и поверхности разрушения по светопоглощающему поверхностному слою.

Все вышерассмотренные мезоструктурные дефекты строения градана-транслятора не могут не снижать коэффициент пропускания лучей видимой части спектра и увеличивают степень рассеяния рабочих лучей.

На рис. 4 представлены результаты измерений диаметров градана-транслятора с аксиальной формой РПП по длине образца с шагом, равным 10 мм, контактными (см. рис. 4, а) и бесконтактными (УИМ-21 В работе принимал участие проф. МИИГАиК Н.Х. Голыгин) методами (см. рис. 4, б). При контактном методе измерений диаметров образца в момент касания плоскостей измерительного инструмента происходил поворот продольной оси, свободно находившегося образца в углублении стальной призмы, на 15...30 угловых градусов по и против часовой стрелки. Угол поворота определялся по двум симметрично расположенным винтам в резьбовой втулке цангового патрона, удерживавшего измеряемый образец. Средняя длина градана, свободно расположенного на предметном столике, по результатам пяти измерений на УИМ-21 составляет 91,9101 мм. На основании совместных экспериментальных измерений, выполнявшихся от входной рабочей плоскости, представленных

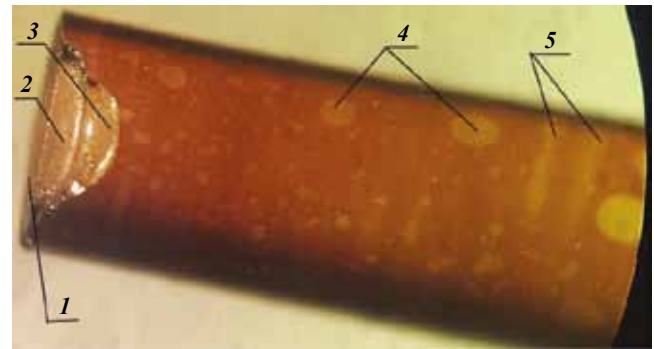


Рис. 3. Вид градана-транслятора с аксиальной формой РПП со стороны выходной рабочей плоскости: 1 — основная рабочая выходная плоскость градана; 2 — поверхность разрушения градана по области низкотемпературного ионообменного слоя; 3 — поверхность разрушения по диффузионному светопоглощающему слою; 4 — вид подповерхностных пузырей; 5 — вид поперечных ликвационных мезодефектов строения (увеличение — 22^х)

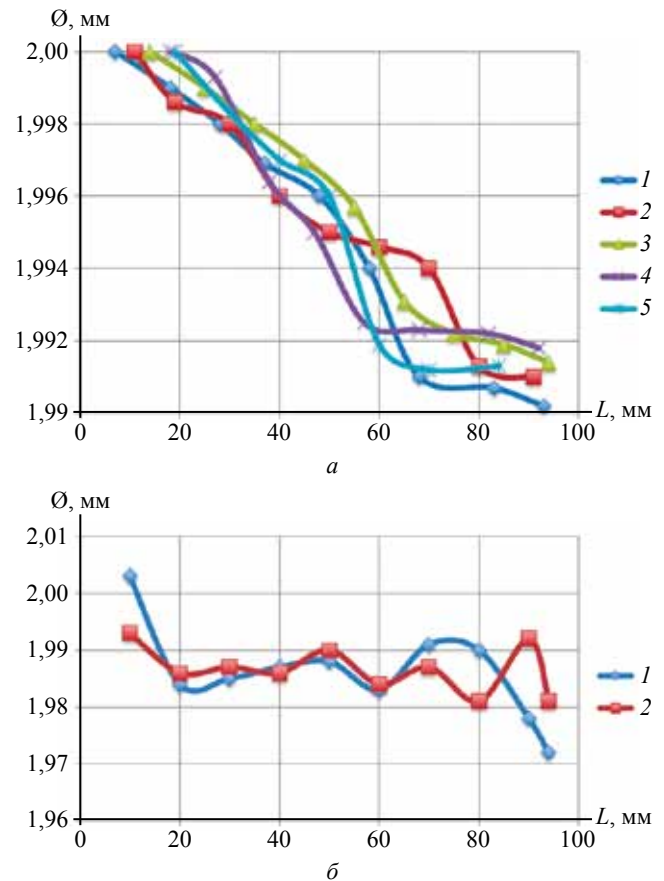


Рис.4. Результаты измерений диаметров градана по длине образца:

а — контактными методами; б — бесконтактными — на УИМ-21:
 1 — базовое измерение; 2 — поворот образца на 90°;
 3 — поворот на 180°; 4 — поворот на 270°; 5 — поворот вновь на базовое измерение

на рис. 4, а, б, возможно предположить ориентировочные расчетные значения конусности, эллипсности и шероховатости (бугристости) внешней поверхности градана-транслятора. Конусность формы градана, рассчитанная по разности средних значений диаметров крайних по длине образца измерений, составляет 15 ± 5 мкм на длине 91,91 мм. Средняя для двух методов измерения эллипсность формы поперечного сечения образца, рассчитанная по величине разброса значений диаметров на расстоянии 20 мм от входной рабочей плоскости градана, составляет 6 ± 4 мкм, а около выходной рабочей плоскости — 9 ± 1 мкм. Шероховатость (бугристость) поверхности в центральной части образца по данным, представленным на рис. 4, а составляет 2 мкм, а по данным рис. 4, б — 5 мкм, что соответствует средней шероховатости поверхности на уровне $3,5 \pm 1$ мкм. Причинами конусности, изменения текстуры боковой поверхности и изменения диаметров в локальных местах транслятора с аксиальной формой РПП, по-видимому, являются изменение химического состава стекла, возможное наличие градиента температуры печи по длине образца в процессе выполнения технологической операции — спекания, а также гравитационная или центробежная технология производства.

Одним из современных и перспективных технологическим способом изготовления граданов-трансляторов с аксиальной формой РПП является мелко-дисперсный помол частиц исходной шихты (фритты) в шаровых, бегунковых, планетарных или других мельницах различных по величине значений плотности стекол (например, легкий крон и тяжелый флинт), их послойное помещение в тигли в определенной пропорции для получения промежуточных составов и последующее спекание. Для формирования градиентной фритты возможно осаждение частиц в гравитационном поле или под действием центробежных сил, т.е. метод седиментации [7]. Процесс седиментации (оседания) для производства граданов с аксиальной формой РПП представляет собой метод неравномерного осаждения частиц ис-

ходных компонентов стекла различной плотности под действием силы гравитации в различных по вязкости жидкостях (вода, спирт и др.). После седиментации следует высокотемпературное длительное спекание шихты-фритты, в процессе которого и могут образовываться подповерхностные пузыри и поверхностные раковины, а также поперечные ликвационные мезодефекты строения.

В работе [8] предпринята попытка установления связи многих конкретных параметров шероховатости поверхности с физико-механическими, химическими и технологическими свойствами исследовавшихся образцов оптических граданов с аксиальной и радиальной формами РПП.

Таким образом, рассмотренные выше дефекты строения граданов объясняются особенностями технологии их производства, которая к настоящему времени еще не достигла своего совершенства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карапетян Г.О., Лившиц В.Я., Петровский Г.Т. Физико-химические основы формирования градиентных оптических сред методом ионного обмена // Физика и химия стекла. – 1979. – Т.5. – №1. – С. 3–25.
2. Лившиц В.Я., Карапетян Г.О. Эффективность изменения показателя преломления стекла при ионном обмене / Тезисы докл. IV Всесоюзный симпозиум. Рига. – 1977. – С. 30–31.
3. Попов Н.Н., Филонов А.С., Донцов Г.А., Ильин В.Г., Матвеев Д.С., Сагалаев Д.А. Перспективные функциональные градиентные оптические среды для оптических модулей космических аппаратов // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2014. – №2. – С. 124–130.
4. Прокошкин Д.А., Васильева Е.В., Попов Н.Н. О дислокационной структуре сплавов ниобия с титаном // Физика металлов и металловедение. – 1968. – Том 25. – №5.
5. Попов Н.Н., Проходцева Л.В., Матвеев Д.С., Родимкина Е.Ю., Афанасов Д.С. Систематизация классов материалов оптотехники // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2014. – №5. – С. 104–111.
6. Попов Н.Н., Филонов А.С., Донцов Г.А., Андреев А.Н., Матвеев Д.С. Функциональные материалы оптических модулей космических аппаратов // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2013. – №5. – С. 109–117.
7. Ильин В.Г., Карапетян Г.О., Косяков В.Н. Физические основы градиентной оптики. – Л.: ЛПИ. – 1990. – 59 с.
8. Попов Н.Н., Гольгин Н.Х., Филонов А.С., Донцов Г.А., Матвеев Д.С., Афанасов Д.С. Текстура поверхности оптических граданов силикатной основы // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2016. – №3. – С. 126 – 135.

Принята к печати 5 апреля 2016 г.
Рекомендована кафедрой
прикладной оптики МИИГАиК

ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ И ПЛАНАРНЫЕ СВЕТОВОДЫ, ФАЗОВЫЕ ПОРТРЕТЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ

© 2016 А.Н. Андреев¹, П.А. Панов²

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

aandr5566@yandex.ru, panovpeter@mail.ru

Аннотация. Модельный пример эллиптического резонатора позволяет сформулировать геометрический признак устойчивости лазерного резонатора и осуществить элементарный вывод стандартного критерия устойчивости. В то же время фазовый портрет оптического резонатора дает возможность наблюдать полную картину поведения световых лучей внутри резонатора, в том числе диагностировать устойчивые периодические траектории световых лучей. Здесь мы также определяем класс эквидистантных планарных периодических световодов и сводим задачу о поведении световых лучей внутри них к соответствующей задаче для оптического резонатора.

Ключевые слова: световой луч, оптический резонатор, эллиптический резонатор, лазерный резонатор, устойчивость, фазовый портрет, планарный световод, эквидистантность

OPTICAL RESONATORS AND PLANAR WAVEGUIDES, CONJUGATE POINTS, PHASE PORTRAITS AND STABILITY

© 2016 Andreev A.¹, Panov P.²

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

²National Research University «Higher School of Economics», Moscow, Russia

aandr5566@yandex.ru, panovpeter@mail.ru

Abstract. A model example of an elliptical resonator allows us to formulate a geometric sign for the stability of the laser resonator and implement elementary derivation of the standard sustainability criteria. At the same time the phase portrait of the optical resonator makes it possible to observe a complete picture of behavior of light rays inside the cavity, including the diagnosis of stable periodic trajectories of light rays. Here we define the class of uniformly spaced periodic planar waveguides and reduce the problem of behavior of light rays inside of them to the corresponding problem for the optical resonator.

Keywords: light beam, an optical resonator, elliptical resonator, laser resonator, stability, phase portrait, a planar waveguide, equidistance

Мы начнем наше обсуждение с модельного примера эллиптического резонатора, а дальше используем полученные результаты для элементарного вывода критерия устойчивости лазерного резонатора. Далее речь пойдет об эквидистантных планарных периодических световодах [1, 2].

Эллиптический резонатор. Поскольку мы занимаемся оптическими задачами, сразу же дадим оптическое определение эллипса. А именно, эллипсом с фокусами F_1 и F_2 называется такая замкнутая кривая, что все лучи, выходящие из одного фокуса, после отражения от нее, собираются в другом фокусе. С оптической точки зрения фокусы являются сопряженными точками эллиптического резонатора. Из этого оптического определения эллипса сразу же выводится его аналитическое определение

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Здесь a и b — большая и малая полуоси эллипса, $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ — фокальное расстояние и $F_{1,2} = (\pm c, 0)$.

В эллиптическом резонаторе имеются две очевидные периодические траектории световых лучей — это большая ось эллипса и его малая ось. Мы рассмотрим свойства устойчивости этих траекторий, и это рассмотрение даст нам ключ к геометрическому признаку устойчивости лазерного резонатора. Дело в том, что вырезая на концах осей эллиптического резонатора по две небольших дуги, мы получим два лазерных резонатора (рис. 1). При этом как раз один из них будет устойчивым, другой — неустойчивым.

Парадоксальные свойства луча, проходящего через фокусы. Из оптического определения эллипса следует, что для построения траектории, проходящей через фокус эллипти-

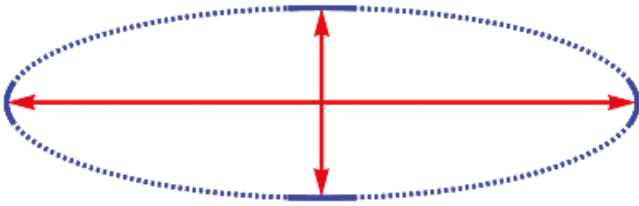


Рис. 1. Два лазерных резонатора, «содержащихся» в одном эллиптическом

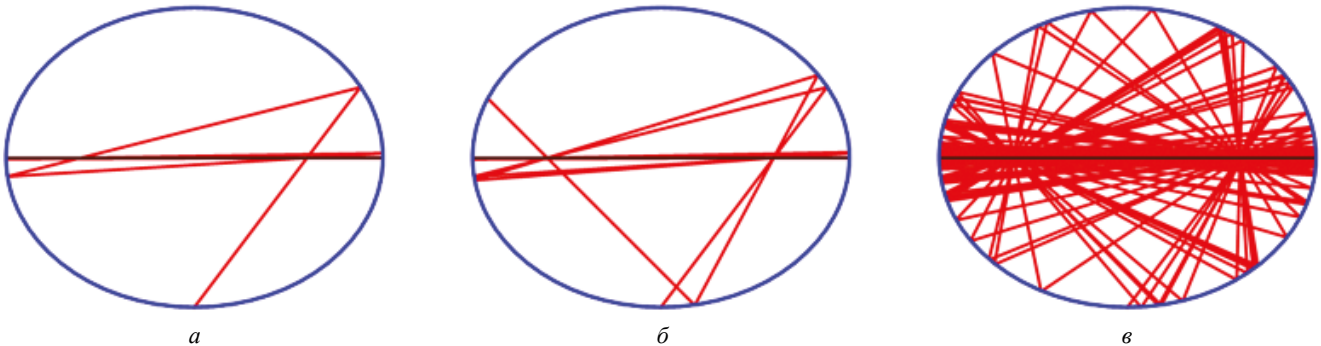


Рис. 2. Траектория луча, проходящего через фокусы:
а — после 10 отражений; б — после 31; в — после 400

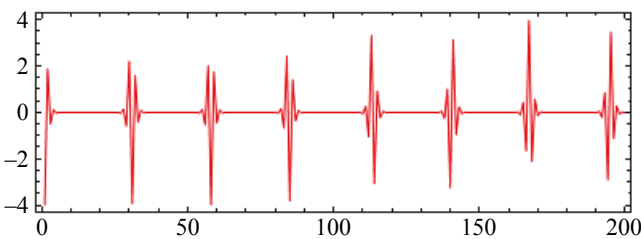


Рис. 3. Биения светового луча, проходящего через фокусы

ческого резонатора, совсем не обязательно использовать закон отражения, достаточно воспользоваться обычной линейкой — если луч прошел через фокус, то и после следующих отражений он так и будет проходить через фокусы. На рис. 2 мы видим траекторию светового луча, запущенного из нижней вершины $(0, -b)$ эллипса с полуосями $a=5$ и $b=4$ и проходящего через фокусы.

Рис. 2, а показывает, что после нескольких отражений световой луч притягивается к большой оси, и более того, рисунок позволяет оценить скорость этого притяжения. Из подобия криволинейных треугольников следует, что она равна $k = \frac{a+c}{a-c}$.

В нашем случае это будет $k=4$ — каждая следующая точка отражения находится в четы-

ре раза ближе к большой оси, чем предыдущая.

Но в то же время рис. 2, б опровергает это логически безупречное рассуждение — после 28 отражения световой луч отбрасывается от большой оси. Дальше луч снова притягивается к большой оси, потом снова отталкивается, и так далее — возникают биения — рис. 2, в. Это явный парадокс — компьютерный эксперимент здесь вступает в противоречие с геометрией.

Чтобы сделать более ясной структуру этих биений, для траектории, представленной на рис. 2, построим еще один график, где вдоль горизонтальной оси откладывается номер точки отражения, а вдоль вертикальной — ордината этой точки (рис. 3).

Объяснение компьютерного парадокса. Итак, мы выяснили, что в эллиптическом резонаторе имеются световые лучи, проходящие вблизи большой оси и притягивающиеся к ней. Таким, например, будет луч, запущенный из нижней вершины и проходящий через фокус. Используем оптический принцип обратимости для одного из таких лучей. Ясно, что при обратном ходе из притягивающегося луча он превратится в луч, отталкивающийся от большой оси. Значит, вблизи большой оси имеются как притягивающиеся к ней световые лучи, так и отталкивающиеся от нее. Воспользуемся этим фактом для разрешения компьютерного парадокса.

Когда мы рассчитываем на компьютере траекторию притягивающегося луча, неизбежно возникают ошибки округления. Как раз из-за них в процессе расчета происходит «пересадка» с притягивающегося луча на отталкивающийся. А после этого отталкивания геометрия эллиптического бильярда опять прижимает

луч к большой оси. Потом этот процесс снова воспроизводится и, таким образом, возникают биения. Косвенным подтверждением этих рассуждений может служить наблюдаемая зависимость периода биений от заданной точности вычислений.

Геометрический признак устойчивости.

На самом деле, предыдущие рассуждения легко переводятся на оптический язык. Наличие двух оптически сопряженных точек на периодической траектории светового луча, вообще говоря, и приводит к существованию близких к ней притягивающихся и отталкивающихся световых лучей. И, вообще говоря, каждый близкий к этой траектории световой луч содержит отталкивающуюся составляющую и поэтому в некоторый момент достаточно далеко уходит от периодической траектории. Наличие сопряженных точек на периодической траектории и есть геометрическое условие ее неустойчивости. В то же время малая ось эллиптического резонатора представляет собой устойчивую периодическую траекторию и сопряженные точки на ней отсутствуют.

Критерий устойчивости лазерного резонатора. Мы используем полученный геометрический признак устойчивости для элементарного вывода известного критерия устойчивости лазерного резонатора. При этом из математики будут использованы только свойства квадратного уравнения, из оптики — только формула сферического зеркала.

Пусть две точки лежат на оси сферического зеркала радиуса R , одна на расстоянии l_1 от вершины сферического зеркала, другая — на расстоянии l_2 (рис. 4). Эти точки сопряжены в том и только в том случае, когда выполняется следующее соотношение (формула сферического зеркала)

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{2}{R}.$$

Рассмотрим лазерный резонатор с зеркалами радиусов R_1 и R_2 и расстоянием между их вершинами, равным L . Геометрический признак устойчивости говорит нам о том, что резонатор будет неустойчивым, если на его оси имеются точки, которые сопряжены относительно одного и другого зеркала, и будет устойчивым, если таких точек нет. Расположим

вершину первого зеркала в точке $(-L/2, 0)$ и вершину второго зеркала в точке $(L/2, 0)$. Пусть пара сопряженных точек имеет координаты $(x_1, 0)$ и $(x_2, 0)$. Запишем одновременно условие сопряженности относительно одного зеркала и относительно другого

$$\begin{cases} \frac{1}{x_1 + L/2} + \frac{1}{x_2 + L/2} = \frac{2}{R_1}; \\ \frac{1}{L/2 - x_1} + \frac{1}{L/2 - x_2} = \frac{2}{R_2}. \end{cases}$$

Эту систему можно разрешить относительно $x_1 + x_2$ и $x_1 x_2$:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = \frac{L(R_1 - R_2)}{2L - R_1 - R_2}; \\ x_1 x_2 = \frac{L(2L^2 - 3LR_1 - 3LR_2 + 4R_1 R_2)}{4(2L - R_1 - R_2)}. \end{cases}$$

И теперь становится понятным, почему эта система может иметь решения, а может не иметь. По теореме Виета числа x_1 и x_2 должны быть корнями квадратного уравнения, а квадратное уравнение может иметь корни, а может не иметь, все зависит от знака его дискриминанта. Дискриминант уравнения вычисляется по формуле $D = (x_1 + x_2)^2 - 4x_1 x_2$, здесь под $x_1 + x_2$ и $x_1 x_2$ подразумеваются правые части последней системы. Этот дискриминант благополучно раскладывается на множители

$$D = \frac{4L(L - R_1)(L - R_2)(L - R_1 - R_2)}{(2L - R_1 - R_2)^2},$$

так что вопрос о его знаке решается без всяких затруднений. Если дискриминант отрицательный, то сопряженных точек нет и лазерный резонатор устойчив. Если же дискриминант положителен, то имеются сопряженные точки и резонатор неустойчив.

После отбрасывания заведомо положительных сомножителей получаем окончательный результат:

$$(L - R_1)(L - R_2)(L - R_1 - R_2) < 0 \text{ — резона-}$$

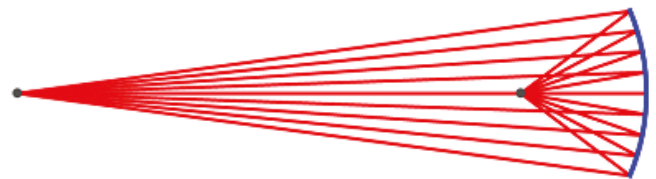


Рис. 4. Сопряженные точки

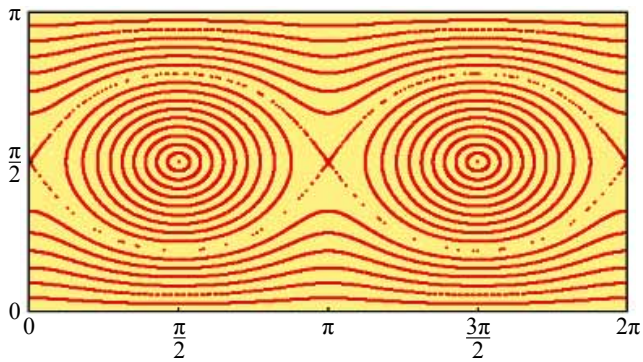


Рис. 5. Фазовый портрет эллиптического резонатора

тор устойчив;

$(L - R_1)(L - R_2)(L - R_1 - R_2) \geq 0$ — резонатор неустойчив).

Это и есть стандартный критерий устойчивости лазерного резонатора.

Фазовый портрет эллиптического резонатора. Можно предложить другой, геометрический взгляд на вопрос об устойчивости периодического светового луча в оптическом резонаторе и, более общим образом, о поведении вообще всех световых лучей внутри резонатора. Мы опять начнем с модельного примера эллиптического резонатора.

Запишем параметрическое уравнение эллиптического резонатора с полуосями a и b :

$$\begin{cases} x = a \cos \varphi; \\ y = b \sin \varphi. \end{cases}$$

Каждый световой луч однозначно определяется последовательностью точек отражения от границы резонатора. Каждую точку отражения на траектории светового луча снабдим двумя фазовыми координатами. А именно, угловой координатой φ , она меняется от 0 до 2π и определяет положение точки отражения на эллипсе. И второй координатой ψ — углом между направлением отраженного луча и границей резонатора, она меняется от 0 до π . Оказывается, что для эллиптического резонатора, на фазовой плоскости с указанными координатами каждая траектория светового луча укладывается на некоторую кривую. Перенеся на фазовую плоскость достаточное количество траекторий, мы и получим фазовый портрет эллиптического бильярда (рис. 5).

Видно, что фазовый портрет содержит богатую информацию о световых лучах в эллиптическом резонаторе. Например, две от-

дельные точки внутри системы овалов соответствуют траектории, идущей вдоль малой оси эллипса. Окружающие их пары овалов представляют лучи, идущие вблизи малой оси. И теперь понятно, что геометрия фазового портрета явным образом говорит об устойчивости светового луча, идущего вдоль малой оси. При малом возмущении его фазовая траектория всего лишь переместится на пару малых овалов, окружающих оба центра, и световой луч будет оставаться вблизи малой оси, попеременно отражаясь от верхней и нижней границы резонатора.

Кроме овалов на фазовом портрете выделяется еще один большой класс фазовых кривых, проходящих вблизи верхней и нижней границы фазового пространства. Они соответствуют световым лучам, идущим вдоль границы резонатора в одну или другую сторону. Разделяющая эти два класса самопересекающаяся кривая называется сепаратрисой, на ней лежат все фазовые траектории, соответствующие световым лучам, проходящим через фокусы.

Точки самопересечения сепаратрисы соответствуют световому лучу, идущему вдоль большой оси эллиптического резонатора. При этом левая и правая точка соответствуют правой вершине эллипса, для которой $\varphi=0$ или $\varphi=2\pi$, центральная точка самопересечения соответствует левой вершине эллипса, для которой $\varphi=\pi$. При малом возмущении луча, идущего вдоль большой оси резонатора, в фазовом пространстве его траектория перескакивает либо на большой овал, либо на большую незамкнутую фазовую кривую. И это приводит к тому, что сам луч с необходимостью удаляется от большой оси на значительное расстояние — световой луч, идущий вдоль большой оси неустойчив.

Позже мы рассмотрим еще один пример оптического резонатора, построим его фазовый портрет и снова убедимся, что это позволяет увидеть общую структуру множества траекторий всех световых лучей и, в частности, идентифицировать устойчивые периодические траектории.

Прежде чем переходить к следующей теме, сделаем еще небольшое математическое отступление. Хорошо известно, что эллиптический резонатор обладает уникальным свойством [3]

— он интегрируем. Это означает, что на фазовом пространстве существует функция, сохраняющаяся вдоль траектории каждого светового луча. Для эллиптического резонатора такой функцией служит

$$I(\varphi, \psi) = \sin^2 \psi \left(\frac{\cos^2 \varphi}{a^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{b^2} \right),$$

и фазовые кривые (рис. 6) лежат на линиях уровня этой функции $I(\varphi, \psi)$.

Эквидистантные планарные световоды.

Рассмотрим простейшую модельную задачу о распространении световых лучей внутри однородного оптического волокна с постоянным показателем преломления, считая что отражение от стенок происходит без потери энергии.

Очевидно, что в цилиндрическом волокне с круговым сечением все входящие в волокно лучи после многократных отражений достигают выходного сечения. В то же время нетрудно представить себе оптическое волокно не обладающее этим свойством — некоторые лучи могут застревать внутри волокна или даже возвращаться назад ко входному сечению. Здесь мы опишем некоторый класс оптических волокон, обладающих свойством полной проходимости, для которых любой вошедший световой луч достигает выходного сечения, это так называемые эквидистантные волокна.

Эквидистантное волокно задается своей осью — пространственной, вообще говоря, кривой C и радиусом поперечного сечения r . Плоские сечения волокна, перпендикулярные оси C , расщепляют эквидистантное волокно на круги одного радиуса r .

То же самое определение можно дать и на оптическом языке. Представим себе, что ось C — это начальный волновой фронт, расположенный в однородной оптической среде. Тогда эквидистантное оптическое волокно представляет собой внутренность волнового фронта, удаленного от начального фронта на расстояние r .

Ясно, что для заданной криволинейной оси C существует целое семейство эквидистантных волокон, параметризуемое радиусом сечения r . Причем r может меняться от сколь угодно малых значений до естественной верхней границы — минимального радиуса кривизны кривой C . Добавим еще, что процесс

вытяжки оптических волокон из заготовок может быть естественным образом адаптирован для изготовления периодических эквидистантных волокон с малой кривизной.

В дальнейшем изложении мы сосредоточимся на планарных эквидистантных световодах. Отметим, что именно планарность и оправдывает введенный нами ранее термин «эквидистантные». Итак, будем считать, что ось волокна представляет собой плоскую кривую C и мы рассматриваем распространение световых лучей именно в этой плоско-

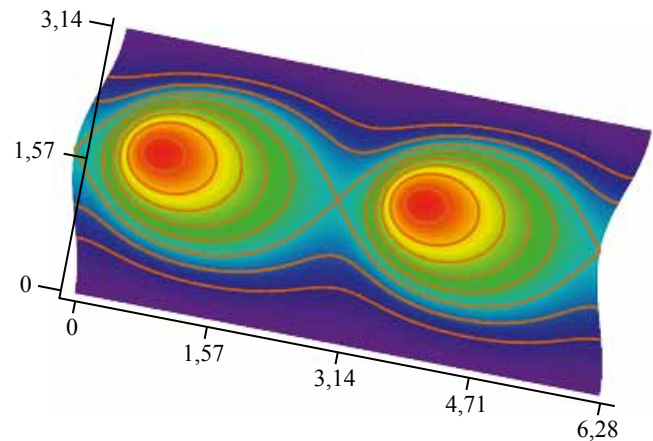


Рис. 6. График функции $I(\varphi, \psi)$

сти. На этот раз условие эквидистантности сводится к тому, что лучи будут распространяться в плоской области, ограниченной двумя эквидистантными в стандартном геометрическом смысле кривыми. То есть отрезок, перпендикулярный к одной кривой, будет перпендикуляром и к другой кривой, и длины всех таких отрезков, соединяющих взаимные точки граничных кривых, будут равны между собой. Таким образом, планарный эквидистантный световод расщепляется на множество отрезков равной длины, перпендикулярных к граничным кривым, как это изображено на рис. 7.

Сквозное прохождение лучей. Начнем с объяснения, почему в эквидистантных волок-

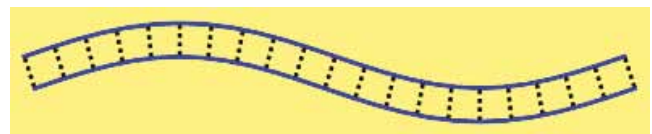


Рис. 7. Планарный эквидистантный световод

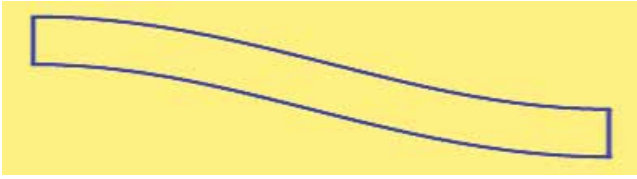


Рис. 8. Оптический резонатор, полученный из периодического световода (см. рис. 7)

нах невозможно возвратное движение световых лучей. Итак, световой луч входит в оптическое волокно, пересекая входное сечение. А дальше дело в том, что в момент перехода от прямого движения к возвратному световой луч должен оказаться целиком лежащим в некотором внутреннем нормальном сечении эквидистантного волокна. Но тогда получается, что световой луч должен был все время находиться в этом сечении, в том числе и в момент входа в волокно, но это явным образом не так.

Итак, световой луч в эквидистантном волокне движется все время в прямом направлении. Но теперь возникает гораздо более тонкий вопрос — не может ли случиться так, что движущий в прямом направлении луч ни в какой момент времени все-таки не достигнет выходного сечения? Не входя в математические подробности, отметим, что в случае гладкого изменения радиуса кривизны волокна такая возможность исключена, световой луч не может застрять внутри волокна и обязательно выйдет из него. В то же время при отсутствии гладкости накопление светового луча внутри эквидистантного волокна возможно [1, 2, 4].

Периодические световоды и оптические резонаторы. В случае периодических эквидистантных световодов можно предложить некоторую редукцию, позволяющую заменить

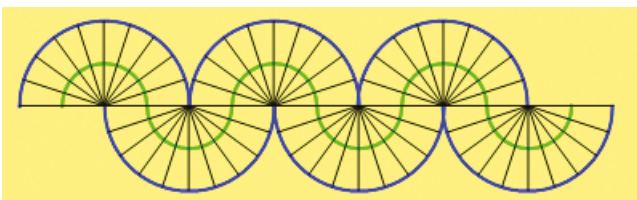


Рис. 9. Эквидистантный световод

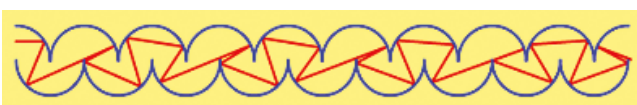


Рис. 10. Траектория светового луча в световоде

исследование поведения лучей в длинном волокне на исследование их поведения в ограниченном оптическом резонаторе. Проще всего объяснить смысл этой конструкции графически, на примере рис. 7. Будем считать, что изображенный там световод периодически продолжается вправо и влево. Предположим также, что планарный эквидистантный световод обладает сечением, являющимся его осью симметрии. Тогда на расстоянии полупериода от этого сечения имеется еще одно сечение, которое тоже является осью симметрии. Рассмотрим оптический резонатор, вырезаемый из световода этими двумя сечениями (рис. 8)

Очевидно, что любая траектория светового луча внутри исходного резонатора получается развертыванием соответствующей траектории внутри этого бильярда. Это развертывание осуществляется при помощи симметрий относительно прямолинейных участков границы резонатора.

От световода к резонатору [1]. Здесь мы подробно обсудим эту редукцию от световода к резонатору для конкретного световода, описанного в [1, 2]. Центральная линия этого эквидистантного световода состоит из полуокружностей радиуса $1/2$, а его границы максимально удалены от C , т.е. удалены на то же самое расстояние $1/2$ и состоят из полуокружностей радиуса 1 (рис. 9). Вот так выглядит одна из траекторий луча внутри этого световода (рис. 10).

Теперь, как было объяснено ранее, вырежем из световода двумя соседними вертикальными отрезками оптический резонатор. Его граница будет состоять из этих двух отрезков и еще двух четвертей окружности. На рис. 11, *a* видно, как будет выглядеть та же самая траектория внутри резонатора.

А теперь перейдем на фазовую плоскость. На этот раз в качестве фазовых переменных выберем канонические координаты. В качестве одной из них используется расстояние вдоль границы резонатора, измеренное от выделенной точки до соответствующей точки отражения. Начальной точкой будет верхний левый угол резонатора. Расстояние будем отмерять против часовой стрелки. Эта линейная координата меняется от 0 до полной длины границы резонатора $2+\pi$. В качестве второй координаты, на этот раз, используем косинус угла меж-

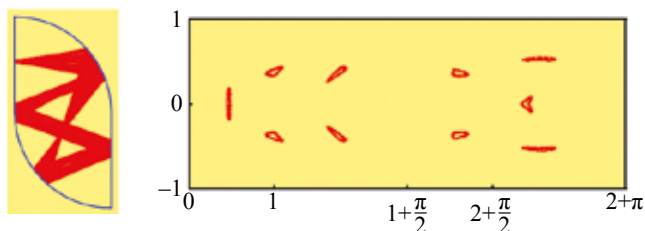


Рис. 11. Траектория светового луча:
a — в резонаторе; *b* — в фазовом пространстве

ду направлением отраженного луча и границей резонатора. Эта координата будет меняться от -1 до 1 . На рис. 11, *b* видно, как в этих координатах выглядит та же самая траектория на фазовой плоскости.

Наконец, построим фазовый портрет оптического резонатора, изображенного на рис. 11. Для этого запустим в резонаторе 19 траекторий, перпендикулярных к левому граничному отрезку резонатора. Эти траектории будем выводить на фазовую плоскость красными точками. Причем после расчета траекторий при выводе на экран компьютера эти красные точки подвергнем малым стохастическим возмущениям. Точно так же запустим 19 траекторий, перпендикулярных к правому граничному отрезку, и будем изображать их на экране компьютера синими точками, подвергнутыми стохастическим возмущениям с меньшей амплитудой. Синие точки выводятся после красных. Полученный таким образом результат изображен на рис. 12.

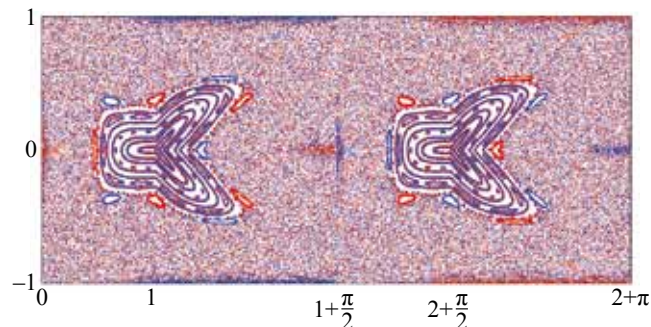


Рис. 12. Фазовый портрет

За счет правильно организованной раскраски четко выделяются квазипериодические траектории, которые подходят перпендикулярно к левому отрезку — красные, и те которые подходят перпендикулярно к правому отрезку — синие, а также центрально-симметричные, перпендикулярные к обоим отрезкам, — красно-синие.

ЛИТЕРАТУРА

1. *O'Rourke J.* Light rays bouncing in twisted tubes, 2011 <http://mathoverflow.net/questions/70421/>
2. *Панов. П.А.* Прохождение света через оптические волноводы и фазовые портреты некоторых резонаторов // *Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации (Распознавание – 2013)*. Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2013. – С. 174–175.
3. *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. – М.: Советское радио, 1966. – 476 с.
4. *Halpern B.* Strange billiard tables. *Trans. AMS* 232, 1977, pp. 297–355.

*Принята к печати 3 марта 2016 г.
 Рекомендована кафедрой
 прикладной оптики МИИГАиК*

ТРИПЛЕТ С ВНУТРЕННЕЙ ФОКУСИРОВКОЙ

©2016 И.П. Шишкин

Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия

shipoflens@mail.ru

Аннотация. Проведены теоретические исследования триплета с внутренней фокусировкой, в результате чего была получена оригинальная формула соотношения оптических сил компонентов, позволяющая получить простое решение для реализации внутренней фокусировки в объективе. На основе анализа aberrаций третьего порядка было показано, что в объективе с таким соотношением оптических сил может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка.

Ключевые слова: проектирование оптических систем, объектив с внутренней фокусировкой, теория aberrаций третьего порядка

TRIPLET LENS WITH INTERNAL FOCUSING

©2016 Shishkin I.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Russia

shipoflens@mail.ru

Abstract. This article reports of a theoretical study of triplet lens with internal focusing. As a result an original formula which describes relations between optical powers of lens units has been introduced. This formula provides a simple solution for focusing function. Using an aberration theory it was proved that optical performances of the triplet lens can be corrected well during focusing.

Keywords: lens design, internal focusing lens, aberration theory

Введение. Конструкция триплета, состоящего из трёх одиночных линз, является наиболее подходящей для реализации внутренней фокусировки в объективе. С одной стороны, этот объектив-анастигмат относится к группе универсальных объективов с относительным отверстием, не превышающим 1:2.8 и полем зрения не более 40...60°, и обладает приемлемым качеством изображения. С другой стороны, конструкция, в которой отрицательная линза расположена между двумя положительными линзами, наиболее рациональна с точки зрения требований, предъявляемых к габаритам и весу подвижного компонента. Эти требования связаны с ограничением по выбору встраиваемых миниатюрных двигателей, которые могут применяться для фокусировки в современных объективах. Остальные возможные комбинации, отступающие от симметрии в отношении знаков оптических сил линз, приводят к значительным трудностям при исправлении полевых aberrаций.

Сравнительная простота оптической схемы триплета позволяет выполнить исследование и расчёт объектива на основе aberrаций третьего порядка. Полагая линзы триплета бесконечно тонкими, можно подобрать такие параметры, через которые большинство aberrаций объектива выражаются линейно. Известно несколько методик расчёта триплета, предложенных Г.Г. Слюсаревым [1], Н.П. Заказовым [2] и др. Во всех методиках расчёта используется способ разделения параметров на внешние, независимые от формы линз, и внутренние, определяющие конструкцию линз объектива.

Выражения, определяющие коэффициенты aberrаций третьего порядка оптической системы, состоящей из трёх тонких компонентов, можно представить в следующем виде [3]:

$$\begin{aligned} S_I &= h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_3 P_3; \\ S_{II} &= y_1 P_1 + y_2 P_2 + y_3 P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= \frac{y_1^2}{h_1} P_1 + \frac{y_2^2}{h_2} P_2 + \frac{y_3^2}{h_3} P_3 + 2 \frac{y_1}{h_1} W_1 + 2 \frac{y_2}{h_2} W_2 + 2 \frac{y_3}{h_3} W_3 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим сначала аналитические зависимости, определяющие выполнение условий масштаба и исправления aberrаций, зависящих от внешних параметров.

Выполнение условий, обеспечивающих исправление сферической аберрации, комы и астигматизма, рационально рассмотреть после определения внешних параметров. Фокусное расстояние объектива принимаем равным единице. Поскольку апертурная диафрагма обычно устанавливается внутри объектива, то для получения более простых зависимостей будем считать, что диафрагма совпадает со вторым компонентом, т.е. $y_2=0$.

Запишем условия нормировки для 1-го и 2-го вспомогательных лучей для предмета на бесконечности:

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_2 = \Phi_1; \quad \alpha_4 = 1; \quad h_1 = 1; \quad \beta_1 = 1; \quad \beta_4 = 0; \quad y_2 = 0.$$

Для упрощения зависимостей (1) необходимо исключить параметры второго вспомогательного луча y_1 и y_3 . При $\beta_1=1$ и $y_2=0$ по формулам углов и высот находим

$$y_2 = y_1 - d_1\beta_2 \Rightarrow y_1 = d_1\beta_2; \quad (2)$$

$$\beta_2 = \beta_1 + y_1\Phi_1 = 1 + y_1\Phi_1 = 1 + d_1\beta_2\Phi_1 \Rightarrow \beta_2 = \frac{1}{1 - d_1\Phi_1}.$$

$$\beta_3 = \beta_2 + y_2\Phi_2 = \beta_2; \quad y_3 = y_2 - d_2\beta_3 = -d_2\beta_2.$$

Поскольку $h_2=1-d_1\Phi_1$, то после подстановки в (2) получаем $\beta_2=1/h_2$.

Тогда с учётом последней зависимости

$$y_1 = \frac{d_1}{h_2}; \quad y_3 = \frac{d_2}{h_2}. \quad (3)$$

Величины d и h связаны между собой по формулам углов и высот:

$$h_2 = 1 - d_1\Phi_1; \quad h_3 = 1 - d_1\Phi_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - d_1\Phi_1\Phi_2). \quad (4)$$

Задача по расчёту триплета [1, 2] при условии исправления пяти монохроматических аберраций третьего порядка состоит в решении уравнений с пятью неизвестными: $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, d_1$ и d_2 .

Поскольку уравнения являются нелинейными относительно неизвестных, то решение системы уравнений весьма затруднительно. Поэтому при исследовании коррекционных возможностей триплета придерживаются следующей последовательности. Задают ряд значений параметрам Φ_1 и Φ_2 и при выбранных марках оптического стекла по формуле исправления кривизны Пецваля находят величину Φ_3 . Затем по условиям масштаба и исправления хроматизма положения определяют высоты h_2 и h_3 . После чего по формулам (4) вычисляют d_1 и d_2 и далее по формулам исправления хроматизма увеличения и дисторсии находят $S_{\text{лхр}}$ и $S_{\text{в}}$. Указанные вычисления выполняют для различных комбинаций марок оптического стекла.

Будем использовать полученные выше зависимости для определения соотношения между пятью параметрами: оптическими силам компонентов Φ_1, Φ_2, Φ_3 и воздушными промежутками d_1 и d_2 при выполнении условия внутренней фокусировки.

Запишем условие заданного фокусного расстояния (условие масштаба): $\Phi_1 + h_2\Phi_2 + h_3\Phi_3 = 1$.

Положим, что $\Phi_1=1, \Phi_2=-1$ и после подстановки в (4) получаем:

$$h_2 = 1 - d_1; \quad h_3 = 1 - d_1 - d_1d_2; \quad \Phi_3 = \frac{1 - d_1}{1 - d_1 - d_1d_2}. \quad (5)$$

Так как в большинстве конструкций триплета приведённые значения величин d_1 и d_2 составляют $0,1 \dots 0,2$, то слагаемые второй степени можно опустить $\Phi_3 = \frac{1 - d_1}{1 - d_1} = 1$.

Таким образом, мы получили простое соотношение приведённых оптических сил компонентов триплета: $\Phi_1:\Phi_2:\Phi_3=1:-1:1$.

Преобразуем формулу (3) с учётом (5): $y_1 = \frac{d_1}{1 - d_1}; \quad y_3 = -\frac{d_2}{1 - d_1}$.

Сделаем преобразования в формулах (1), определяющих коэффициенты aberrаций третьего порядка, исключив h_2, h_3, y_1 и y_3 :

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + (1-d_1)P_2 + (1-d_1)P_3; \\ S_{II} &= \frac{d_1}{1-d_1}P_1 - \frac{d_2}{1-d_1}P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= \frac{d_1^2}{1-d_1}P_1 + \frac{d_2^2}{1-d_1}P_3 + 2d_1W_1 - 2d_2W_3 + 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Для решения задачи выразим параметры P и W через основные параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы [1]:

$$\begin{aligned} P_i &= (\alpha'_i - \alpha_i)^3 \mathbf{P}_i + 4\alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i)^2 \mathbf{W}_i + \alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i) [2\alpha_i (2 + \pi) - \alpha'_i]; \\ W_i &= (\alpha'_i - \alpha_i)^2 \mathbf{W}_i + \alpha_i (\alpha'_i - \alpha_i) (2 + \pi). \end{aligned} \quad (7)$$

Для первого компонента $\alpha = 0, \alpha' = \alpha_2 = 1$; для второго $\alpha = \alpha_2 = 1, \alpha' = \alpha_3$; для третьего $\alpha = \alpha_3, \alpha' = \alpha_4 = 1$, поэтому:

$$\begin{aligned} P_1 &= \mathbf{P}_1; \quad W_1 = \mathbf{W}_1; \\ P_2 &= (\alpha_3 - 1)^3 \mathbf{P}_2 + 4(\alpha_3 - 1)^2 \mathbf{W}_2 + (\alpha_3 - 1) [2(2 + \pi) - \alpha_3]; \\ W_2 &= (\alpha_3 - 1)^2 \mathbf{W}_2 + (\alpha_3 - 1)(2 + \pi); \\ P_3 &= (1 - \alpha_3)^3 \mathbf{P}_3 + 4\alpha_3 (1 - \alpha_3)^2 \mathbf{W}_3 + (1 - \alpha_3) [2\alpha_3 (2 + \pi) - 1]; \\ W_3 &= (1 - \alpha_3)^2 \mathbf{W}_3 + \alpha_3 (1 - \alpha_3)(2 + \pi). \end{aligned} \quad (8)$$

Определим систему, удовлетворяющую условию $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$.

После подстановки значений $d_1 = 0,2$ и $d_2 = 0,1$ формулы (6) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + \frac{4}{5}P_2 + \frac{4}{5}P_3; \\ S_{II} &= \frac{1}{4}P_1 - \frac{1}{8}P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= \frac{1}{20}P_1 + \frac{1}{80}P_3 + \frac{2}{5}W_1 - \frac{1}{5}W_3 + 1. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2\Phi_2 = 1 + (1 - d_1) = 2 - 0,2 = 1,8.$$

Выразим параметры P и W через параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы (8):

$$\begin{aligned} P_1 &= \mathbf{P}_1; \quad W_1 = \mathbf{W}_1; \\ P_2 &= 0,51\mathbf{P}_2 + 2,56\mathbf{W}_2 + 2,8; \\ W_2 &= 0,64\mathbf{W}_2 + 2,12; \\ P_3 &= -0,51\mathbf{P}_3 + 4,61\mathbf{W}_3 - 8,1; \\ W_3 &= 0,64\mathbf{W}_3 - 3,8. \end{aligned}$$

И после подстановки в (9) получим окончательные выражения для сумм Зейделя:

$$\begin{aligned} S_I &= \mathbf{P}_1 + 0,41\mathbf{P}_2 + 2,05\mathbf{W}_2 - 0,41\mathbf{P}_3 + 3,69\mathbf{W}_3 - 4,24; \\ S_{II} &= 0,25\mathbf{P}_1 + 0,06\mathbf{P}_3 + \mathbf{W}_1 + 0,64\mathbf{W}_2 + 0,06\mathbf{W}_3 - 0,67; \\ S_{III} &= 0,05\mathbf{P}_1 - 0,05\mathbf{P}_3 + 0,4\mathbf{W}_1 - 0,08\mathbf{W}_3 + 1,68. \end{aligned} \quad (10)$$

Запишем условия нормировки для 1-го и 2-го вспомогательных лучей для предмета на конечном расстоянии и будем считать, что при фокусировке объектива на конечное расстояние воздушные промежутки между компонентами изменятся таким образом, что $d_1=d_2$ и $d_2=d_1$

$$\tilde{\alpha}_1 = -\frac{1}{10}; \quad \tilde{h}_1 = 1; \quad \beta = -\frac{1}{10}; \quad \tilde{\beta}_1 = 1; \quad \tilde{y}_1 = s_p = \frac{1}{10}; \quad \tilde{d}_1 = 0,1; \quad \tilde{d}_2 = 0,2.$$

где $\tilde{\alpha}, \tilde{h}, \tilde{\beta}, \tilde{y}, \tilde{d}$ — обозначены параметры для предмета на конечном расстоянии.

По формулам углов и высот последовательно находим значения

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_2 &= \tilde{\alpha}_1 + \tilde{h}_1 \Phi_1 = -\frac{1}{10} + 1 = \frac{9}{10}; & \tilde{h}_2 &= \tilde{h}_1 - \tilde{d}_1 \tilde{\alpha}_2 = 1 - \frac{1}{5} \times \frac{9}{10} \approx \frac{4}{5}; \\ \tilde{\alpha}_3 &= \tilde{\alpha}_2 + \tilde{h}_2 \Phi_2 = \frac{9}{10} + \frac{4}{5} = \frac{17}{10}; & \tilde{h}_3 &= \tilde{h}_2 - \tilde{d}_2 \tilde{\alpha}_3 = \frac{4}{5} - \frac{1}{10} \times \frac{17}{10} \approx \frac{3}{5}; \\ \tilde{\alpha}_4 &= \tilde{\alpha}_3 + \tilde{h}_3 \Phi_3 = \frac{17}{10} - \frac{3}{5} = \frac{11}{10}. \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\beta}_2 &= \tilde{\beta}_1 + \tilde{y}_1 \Phi_1 = 1 + \frac{1}{10} = \frac{11}{10}; & \tilde{y}_2 &= \tilde{y}_1 - \tilde{d}_1 \tilde{\beta}_2 = \frac{1}{10} - \frac{1}{5} \times \frac{11}{10} \approx -\frac{1}{10}; \\ \tilde{\beta}_3 &= \tilde{\beta}_2 + \tilde{y}_2 \Phi_2 = \frac{11}{10} + \frac{1}{10} = \frac{6}{5}; & \tilde{y}_3 &= \tilde{y}_2 - \tilde{d}_2 \tilde{\beta}_3 = -\frac{1}{10} - \frac{1}{10} \times \frac{6}{5} \approx -\frac{1}{5}; \\ \tilde{\beta}_4 &= \tilde{\beta}_3 + \tilde{y}_3 \Phi_3 = \frac{6}{5} - \frac{1}{5} = 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставим полученные значения углов и высот (11,12) в формулы (1), определяющие коэффициенты аберраций третьего порядка

$$\begin{aligned} S_I &= P_1 + \frac{4}{5} P_2 + \frac{3}{5} P_3; \\ S_{II} &= \frac{1}{10} P_1 - \frac{1}{10} P_2 - \frac{1}{5} P_3 + W_1 + W_2 + W_3; \\ S_{III} &= \frac{1}{100} P_1 + \frac{1}{80} P_2 + \frac{1}{15} P_3 + 2W_1 - \frac{1}{4} W_2 - \frac{2}{3} W_3 + 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Выразим параметры P и W через параметры \mathbf{P} и \mathbf{W} , используя формулы (7):

$$\begin{aligned} P_1 &= (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1)^3 \mathbf{P}_1 + 4\tilde{\alpha}_1 (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1)^2 \mathbf{W}_1 + \tilde{\alpha}_1 (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1) [2\tilde{\alpha}_1 (2 + \pi) - \tilde{\alpha}_2]; \\ W_1 &= (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1)^2 \mathbf{W}_1 + \tilde{\alpha}_1 (\tilde{\alpha}_2 - \tilde{\alpha}_1) (2 + \pi); \\ P_2 &= (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2)^3 \mathbf{P}_2 + 4\tilde{\alpha}_2 (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2)^2 \mathbf{W}_2 + \tilde{\alpha}_2 (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2) [2\tilde{\alpha}_2 (2 + \pi) - \tilde{\alpha}_3]; \\ W_2 &= (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2)^2 \mathbf{W}_2 + \tilde{\alpha}_2 (\tilde{\alpha}_3 - \tilde{\alpha}_2) (2 + \pi); \\ P_3 &= (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3)^3 \mathbf{P}_3 + 4\tilde{\alpha}_3 (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3)^2 \mathbf{W}_3 + \tilde{\alpha}_3 (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3) [2\tilde{\alpha}_3 (2 + \pi) - \tilde{\alpha}_4]; \\ W_3 &= (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3)^2 \mathbf{W}_3 + \tilde{\alpha}_3 (\tilde{\alpha}_4 - \tilde{\alpha}_3) (2 + \pi). \end{aligned}$$

И после подстановки в (13) получим окончательные выражения для сумм Зейделя:

$$\begin{aligned} P_1 &= \mathbf{P}_1 + 4\mathbf{W}_1 + 0,62; & W_1 &= \mathbf{W}_1 - 0,27; \\ P_2 &= 1,12\mathbf{P}_2 + 2,3\mathbf{W}_2 + 2,21; & W_2 &= 0,64\mathbf{W}_2 + 1,91; \\ P_3 &= -0,22\mathbf{P}_3 + 2,45\mathbf{W}_3 + 8,07; & W_3 &= 0,36\mathbf{W}_3 - 2,7. \end{aligned} \quad (14)$$

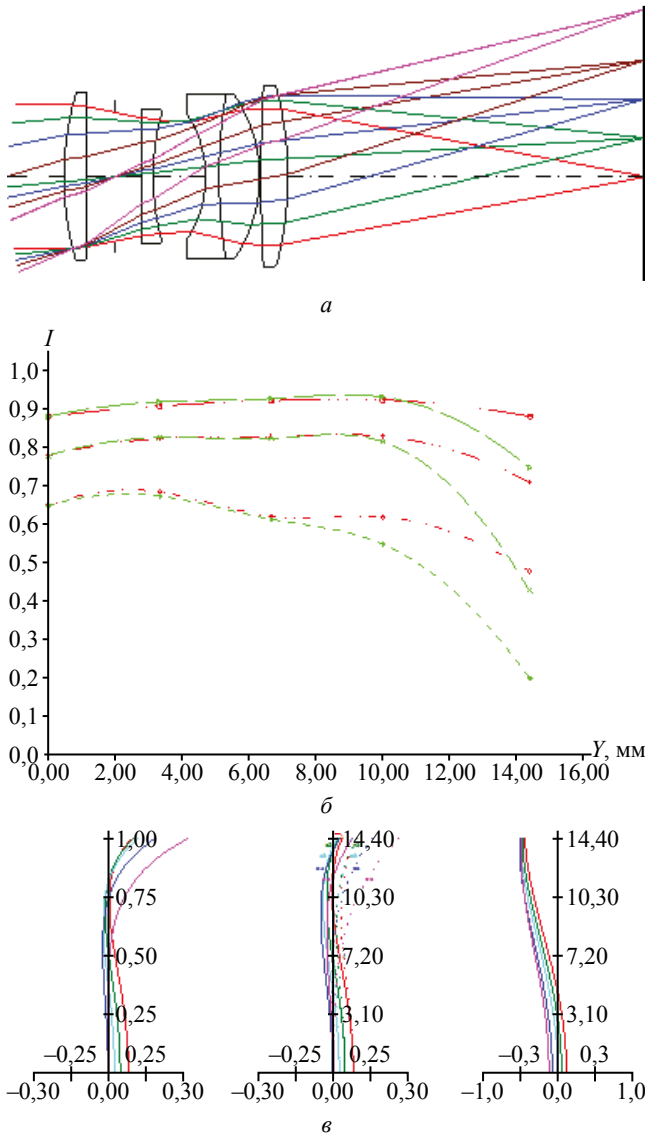


Рис. 1. Характеристики объектива для предмета на бесконечность:
a — вид объектива; *б* — оптическая передаточная функция;
в — угловые aberrации

Полученные в ходе исследования результаты показывают, что найденная конфигурация объектива может иметь удовлетворительную коррекцию трёх монохроматических aberrаций. Сравнивая формулы (10) и (14) можно видеть, что и в положении бесконечно удалённого предмета и при фокусировке на близкое расстояние, суммы aberrаций меняются незначительно.

Для эффективного решения задачи коррекции aberrаций достаточно положить $P_1 = P_2 = P_3 = W_1 = W_2 = W_3 = 0$. А так как члены выражений сумм aberrаций имеют близкие значения для обоих положений предмета, то при

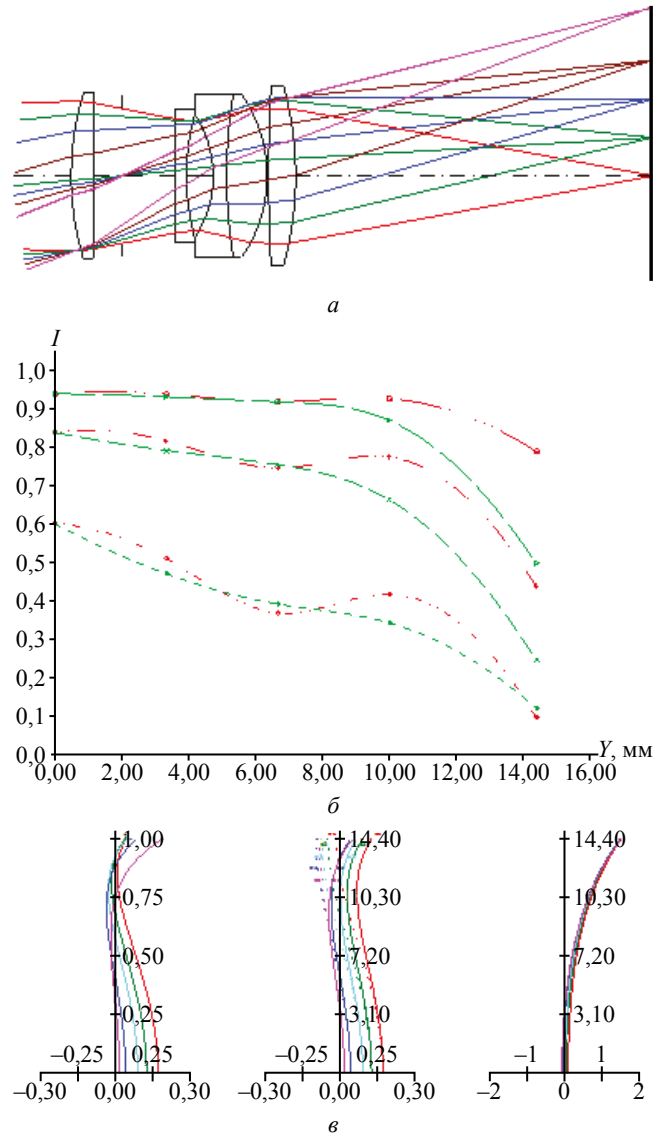


Рис. 2. Характеристики объектива при фокусировке на 0,5 м:
a — вид объектива; *б* — оптическая передаточная функция;
в — угловые aberrации

изменении положения предметной плоскости качество изображения не будет ухудшаться, оставаясь на одном уровне.

Заключение. В результате проведённых теоретических исследований триплета была получена оригинальная формула соотношения оптических сил компонентов, позволяющая получить простое решение для реализации внутренней фокусировки в объективе. На основе анализа aberrаций третьего порядка было показано, что в объективе с таким сочетанием оптических сил может быть достигнута удовлетворительная коррекция монохроматических aberrаций третьего порядка. Полученные

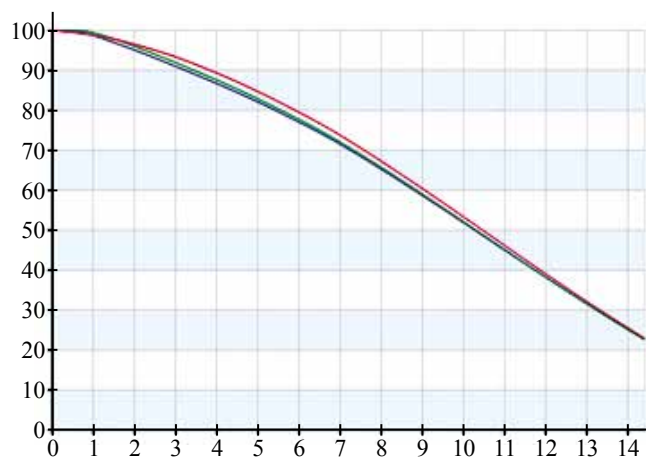


Рис. 3. Вьетирование:

— для предмета на бесконечности; — при фокусировке на 0,5 м

результаты легли в основу разработки объектива с фокусным расстоянием 35 мм и относи-

тельным отверстием 1:2.8, с полем зрения 45° и с ближней дистанцией фокусировки 0,5 м, который был сконструирован и запущен в серийное производство (см. рис.).

Данное решение может найти применение при проектировании компактных фото- и видеокамер, объективов минипроекторов, камер мобильных устройств: смартфонов, гаджетов, планшетов, ноутбуков и автомобильных камер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1975. – 640с.
2. Заказов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
3. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969. – 671с.

Принята к печати 29 февраля 2016 г.

Рекомендована кафедрой прикладной оптики МИИГАиК.



ДУБОВИК АЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ (1916–1999)

Профессор, доктор технических наук, Лауреат Ленинской и Государственной премий, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Почетный работник высшего профессионального образования России.

Александр Семенович родился 29 августа 1916 г. в Сумской области в поселке Сахарный завод. Увлеченный с детства техникой, свою трудовую деятельность он начал после окончания семилетки учеником слесаря. В 1932 г. поступил на рабфак Московского геодезического института (МГИ — так назывался наш университет в 1930–1936 гг.), а с 1933 по 1939 г. обучался на оптико-механическом факультете, который закончил с отличием. Талантливый, любознательный и трудолюбивый студент, он обратил на себя внимание декана оптико-механического факультета, заведующего кафедрой прикладной оптики, профессора Бориса Владимировича Фефилова.

В эти годы студент А. Дубовик отметился и одним, достаточно курьезным, фактом. В 1930 г. на базе геодезического факультета Московского межевого института (название МИИГАиК до 1930 г.) в системе Наркомтяжпрома (НКТП) создается Московский геодезический институт, а на базе землеустроительного — Московский землеустроительный институт (МЗИ). До 1936 г., когда для МЗИ на улице Казакова было построено новое здание, оба института располагались в здании по Гороховскому переулку, дом 4. В апреле 1936 г., после переезда МЗИ в новое здание, МГИ передается из системы НКТП в систему НКВД (Народный комиссариат внутренних дел) и переименовывается в Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК),

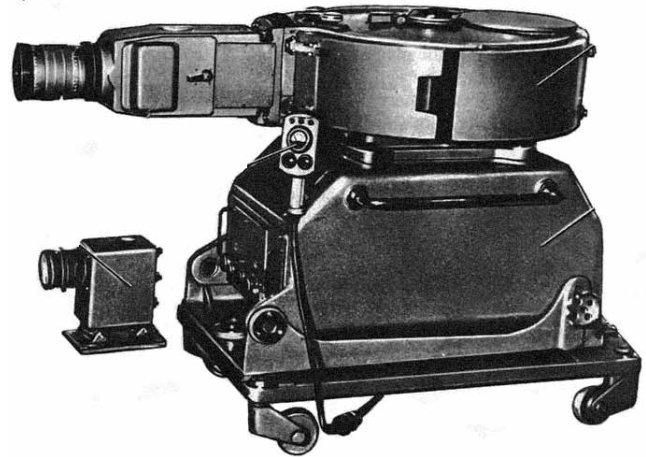
а здание капитально ремонтируется [1]. Летом 1936 г. руководство поручает двум лучшим студентам, находящимся в институте на практике при кафедре прикладной оптики, А.С. Дубовику и М.И. Апенко (впоследствии профессор кафедры прикладной оптики, Лауреат Государственной премии) выполнить новую нумерацию аудиторий института. На их вопрос — «как?» ответ был — «сами думайте...». Студенты-оптики, естественно, смело начали со своей кафедры. В результате аудитория, находящаяся на третьем этаже самого дальнего крыла от главного входа со стороны Гороховского переулка, получила номер 1. В этой аудитории кафедра прикладной оптики находится и поныне. Нумерация аудиторий, начатая с третьего этажа, была продолжена «добросовестными студентами» на втором, затем первом, наконец, цокольном этажах, и была закончена на третьем этаже Демидовского особняка, где ныне расположена кафедра прикладной геодезии. Эту историю со смехом и юмором рассказывали сами Александр Семенович и Михаил Иванович, будучи уже профессорами кафедры прикладной оптики. С тех пор нумерация аудиторий стала предметом шуток и достопримечательностью МИИГАиК.

После окончания института Александр Семенович работал в оборонной промышленности на заводе «Геодезия», а с 1946 по 1963 гг. — в специальном секторе института Химической физики АН СССР (ИХФ АН СССР), где защитил кандидатскую и докторскую диссертации. При создании атомной бомбы имплозионного типа было необходимо добиться получения ударной волны химического взрывчатого вещества (ВВ) с фронтом детонации, направленным внутрь строго в одну точку

— центр сферы. Для исследования процессов детонации ВВ на первом этапе исследований применялся дисковый фотохронограф, разработанный Н.П. Швилкиным. Результаты измерений с помощью такого фотохронографа не удовлетворяли требованиям, необходимым для решения поставленной задачи. Поэтому дисковый фотохронограф поначалу применялся не для количественных измерений, а лишь с целью качественной отработки самой методики. Разработка и изготовление зеркального фотохронографа, обеспечивающего точное измерение мгновенных значений скорости движения фронта детонации ВВ, были выполнены в ИХФ АН СССР. Авторами схемы и технического задания были А.Д. Захаренко и А.С. Дубовик [2]. За работы в области регистрации быстропротекающих процессов при создании и испытаниях ядерного оружия, Александр Семенович был удостоен Ленинской и Государственной премий.

С 1963 по 1970 г. А.С.Дубовик работал в институте физики Земли, а затем во Всесоюзном научно-исследовательском институте оптико-физических измерений в должности заведующего лабораторией. С 1964 по 1975 г. был по совместительству профессором, а затем заведующим кафедрой оптических приборов во Всесоюзном заочном машиностроительном институте.

В 1976 г. Александр Семенович вернулся в родной ВУЗ, где возглавил кафедру прикладной оптики. Под его руководством на кафедре развилось новое научное направление — разработка оптических систем и приборов для исследования быстропротекающих процессов методами высокоскоростной фотографии, кинематографии и фотоники. Были достигнуты значительные успехи в области создания уникальных «ждуших» (не требующих синхронизации начала съемки с началом изучаемого процесса) кинокамер с оптико-механической коммутацией изображения и частотой съемки до нескольких миллионов кадров в секунду; зеркальных фотохронографов, работающих в широком диапазоне длин волн (0,38–10,6 мкм); высокоскоростных кинокамер с призменной и зеркальной компенсацией сдвига изображения, где удалось значительно повысить (до 36 лин/мм) разрешающую способность си-



Ждущая лупа времени ЖЛВ-2
(высокоскоростной кинорегистратор
с частой съемки до 4,5 млн кадров/с)

стемы и тем самым заложить основы прецизионной скоростной кинокамеры.

В 1980–1985 г. Александр Семенович был деканом факультета оптического приборостроения МИИГАиК.

А.С.Дубовик — один из ведущих специалистов в области оптического приборостроения, имел свыше 40 изобретений, более 200 опубликованных работ, автор и соавтор двух учебников и двух монографий, одна из которых была переиздана в США и Великобритании. Им были подготовлены 23 кандидата и доктора технических наук. В течение ряда лет он был заместителем председателя, а затем и председателем Советского комитета по высокоскоростной фотографии и фотоники и Национальным делегатом СССР на Международном Конгрессе в этой области. За заслуги в области развития отечественного оптического приборостроения и вклад в укрепление обороны страны А.С.Дубовик награжден орденом Ленина, орденом «Знак почета», многими, в том числе зарубежными, медалями.

*Аспирант А.С.Дубовика (1983–1985 гг.),
доцент кафедры прикладной оптики,
кандидат технических наук*

Андреев Андрей Николаевич

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазмишвили А.И. Высшая картографо-геодезическая школа СССР: Сб. статей XX лет советской геодезии и картографии / Под общ. ред. А.Н. Баранова, М.: Изд. Редбюро ГУГК при СНК СССР. – 1939. – Т. 1. – С. 367–404.
2. Жучихин В.И. Первая атомная. – М.: ИздАТ, 1993. – 111 с.

50 ЛЕТ СЛУЖЕНИЯ МИИГАиК

20 сентября 2016 года — годовщина смерти

СВЯТОСЛАВА ВЛАДИМИРОВИЧА ЛЕБЕДЕВА.

В течение 50 лет Святослав Владимирович преподавал в МИИГАиК. Читал лекции, вел лабораторные и практические занятия по всем разделам высшей геодезии на факультетах МИИГАиК: геодезическом, прикладной космонавтики, на заочном факультете. Руководил дипломными работами студентов и магистерскими диссертациями. Был научным консультантом и руководителем аспирантов и соискателей ученых степеней, стажеров. Под его руководством защищены докторская и несколько кандидатских диссертаций. Его консультации были всегда хорошей помощью многим поколениям инженеров и молодых ученых.

Вся его жизнь была связана с кафедрой высшей геодезии МИИГАиК, на которой он работал в должностях аспиранта, доцента, профессора, с 1988 по 1989 г. исполнял обязанности заведующего кафедрой.

Святослав Владимирович родился в г. Белград в Югославии, с 1958 по 1963 гг. учился в МИИГАиК, на последних курсах работал в экспедиции № 31 Гидропроекта, экспедиции отряда № 63 Читинского аэрогеодезического предприятия и одновременно проводил занятия в институте. По окончании института поступил в аспирантуру. Защитил в 1971 г. диссертацию кандидата технических наук. В 1974 г. был утвержден в ученном звании доцент по кафедре высшей геодезии. В 1988 г. защитил диссертацию на степень доктора технических наук.

Святослав Владимирович активно участвовал в научно-исследовательских работах в качестве ответственного исполнителя и руководителя. По результатам научных исследований опубликовано более 70 работ. Занимался современными проблемами геодезии, объединяя комплекс дисциплин, образующих фундамент научно-технической отрасли геодезических знаний. Особое внимание он уделял фундаментальным направлениям — изучению фигуры Земли, геодезической гравиметрии. Его основные научные интересы относились к статистическим методам и актуальным задачам изучения характеристик поля силы тяжести, применения в геодезии методов коллокации, практическим задачам инерциальной гравиметрии и градиентометрии.

Святослав Владимирович направлял научные интересы кафедры на изучение Земли как планеты и связи геодезии с геофизикой, геодинамикой, астрометрией, на решение задач изучения движения полюсов и особенностей вращения Земли, создания систем координат, определения деформаций земной коры, изучения поверхности Мирового океана. Он был инициатором преподавания новых дисциплин в МИИГАиК и как никто умел связывать повседневную производственную деятельность с фундаментальными теоретическими знаниями.

С.В. Лебедев — почетный работник геодезии и картографии Российской Федерации, заслуженный работник науки и техники, доктор технических наук, профессор кафедры высшей геодезии МИИГАиК, «почетный профессор МИИГАиК».



Содержание

АСТРОНОМИЯ, ГРАВИМЕТРИЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Черный А.Н. От большого взрыва до ускоренного расширения вселенной	3
Дроздов Н.Д. О гравитационных полях внутри притягивающих масс	8
Абакушина М.В., Непоклонов В.Б., Моисеева В.С. Современные зарубежные цифровые модели геоида в континентальных районах	13

ГЕОДЕЗИЯ И КАДАСТР

Копейкин С., Хан В., Мазурова Е. Теоремы Пицетти и Клеро в пост-Ньютоновском приближении	21
Медведев П.А. Математические модели обобщенного эллиптического интеграла для вычисления длины геодезической линии	29
Герасименко М.Д., Шестаков Н.В. Интервальная математика и перспективы ее применения в геодезии	38
Горяинов И.В. О наилучшей конфигурации обратной линейно-угловой засечки и необходимом количестве пунктов для достижения заданной точности	41
Фялковский А.Л. Методика повышения детальности траектории и точности вычисления координат динамических сооружений при мониторинге с использованием ГНСС	48
Пимшин Ю.И., Ключин Е.Б., Медведев В.Н., Губеладзе О.А., Наугольников В.А., Заяров Ю.В., Забазнов Ю.С. Диагностика технического состояния защитных герметичных оболочек АЭС	55
Валиева А.Р. Обоснование применения лазерного сканирования в оценке деформаций высотных конструкций	60
Лелюхина А.М., Смородина А.С., Миклашевская О.В. Проблематика совершенствования функционирования системы кадастрового учета в РФ	64
Илюшина Т.В. Межевание и картографирование первой губернии России	71

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

Грищенко М.Ю., Гнеденко А.Е. Дешифрирование и картографирование изменения положения береговой линии южной части острова Кунашир по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения	78
---	----

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

Миртова И.А., Швецов Д.В. Использование методов дистанционного зондирования для целей локального мониторинга опасных экзогенных процессов	84
Каркон варносфадерани М.М., Харазми Р.С., Шаповалов Д.А., Митрофанов Е.М. Оценка точности визуального дешифрирования растительного покрова на основе вегетационных индексов (на примере Загроста, западный Иран)	90
Абдуллин Р.К., Шихов А.Н. Методика идентификации смерчевых ветровалов по спутниковым снимкам Landsat и тематическим продуктам их обработки	93
Поддубная К.В. Сравнительная оценка нормативных показателей воздействия поллютантов на окружающую среду на примере ВОЗ, Европейского союза, Российской Федерации, Финляндии, Швеции и Норвегии	100
Буров В.Н., Поддубная К.В. Экологический кризис как эволюционное понятие	102

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Левитская З.В., Гаврилова В.В. Контент геоинформационного портала Федерального агентства лесного хозяйства	104
Мельникова Е.Б., Тамбиев К.А. Методика создания учебного пособия «Глобальные проблемы человечества»	110

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Попов Н.Н., Филонов А.С., Донцов Г.А., Сагалаев Д.А., Афанасов Д.С. Строение градианов с аксиальной формой распределения показателя преломления	119
Андреев А.Н., Панов П.А. Оптические резонаторы и планарные световоды, фазовые портреты и устойчивость	127
Шишкин И.П. Триплет с внутренней фокусировкой	134

Дубовик Александр Семенович (1916–1999)	140
50 лет служения МИИГАиК	142

Contents

ASTRONOMY, GRAVIMETRY, AND SPACE GEODESY

<i>Cherniy A.</i> From Big Bang to Acceleration of Expansion.....	3
<i>Drozhdov N.</i> Gravity Fields Inside Attraction Masses.....	8
<i>Abakushina M., Nepoklonov V., Moiseeva V.</i> Modern Foreign Digital Geoid Models in Continental Areas.....	13

GEODESY AND CADASTRE

<i>Kopeikin S., Han W., Mazurova E.</i> Pitsetti's and Clairaut's Theorems in the Post-Newtonian Approach.....	21
<i>Medvedev P.</i> Mathematical Models of Generalized Elliptic Integral in Order to Calculate the Length of Geodetic Line.....	29
<i>Gerasimenko M., Shestakov N.</i> Interval Mathematics and Prospects of Its Application in Geodesy.....	38
<i>Goryainov I.</i> On the Best Configuration of the Inverse Linear-Angular Serifs and the Required Amount of Points to Achieve the Desired Accuracy.....	41
<i>Fialkovskiy A.</i> Method of Improve Detail of the Trajectory and Increase Accuracy of the Coordinates Calculation of Dynamic Constructions for Monitoring by GNSS.....	48
<i>Pimshin Yu., Klushin E., Medvedev V., Gubeladze O., Naugol'nov V., Zayarov Yu., Zabaznov Yu.</i> On Checking a Technical Condition of Protective Leak-Tight Containment of Nuclear Power Plants.....	55
<i>Valieva A.</i> Justification for Applying the Laser Scanning to Strain Evaluation of High-Rise Buildings.....	60
<i>Lelukhina A., Smorodina A., Miklashevskaya O.</i> Problems of Improving the Functioning of the System of Cadastre Registration in the Russian Federation.....	64
<i>Ilyushina T.</i> Surveying and Mapping of the First Province in Russia.....	71

SPACE SURVEY, AEROPHOTOGRAPHY, AND PHOTOGRAMMETRY

<i>Grishchenko M., Gnedenko A.</i> Revealing and Mapping the Coastline Changes of The Kunashir Island Southern Coast Using Satellite Imagery with Ultra-High Spatial Resolution.....	78
--	----

REMOTE SENSING, AND LAND MONITORING

<i>Mirtova I., Shvetsov D.</i> Using Remote Sensing Methods to Monitor Hazardous Exogenous Processes.....	84
<i>Mansour Karkon Varnosfaderani, Kharazmi R., Shapovalov D., Mitrofanov E.</i> Accuracy Ranking of Plant Cover Visual Photo Interpretation Based on Vegetation Indices (The Zagros Mountains, West Iran Are Taken As An Example).....	90
<i>Abdullin R., Shikhov A.</i> Methods of Identifying Tornado Windfalls Using Landsat Image Data and Thematic Products Got After These Data Processing.....	93
<i>Poddubnaya K.</i> Comparative Analysis of Enviromental Pollution Indices Data of WHO, EU, the Russian Federation, Finland, Sweden and Norway Were Taken as an Example.....	100
<i>Burov V., Poddubnaya K.</i> Ecological Crisis as an Evolutionary Category.....	102

GEOINFORMATION TECHNOLOGY

<i>Levitskaya Z., Gavrilova V.</i> Federal Forestry Agency Gis Portal.....	104
<i>Mel'nikova E., Tambiev K.</i> «Global Problems Of Humanity» Textbook Development Methodology.....	110

GEODESIC INSTRUMENT MAKING

<i>Popov N., Filonov A., Dontsov G., Sagalaev D., Afanasov D.</i> Gradans Which Have Axial Form of Graded Refractive Index.....	119
<i>Andreev A., Panov P.</i> Optical Resonators and Planar Waveguides, Conjugate Points, Phase Portraits and Stability.....	127
<i>Shishkin I.</i> Triplet Lens With Internal Focusing.....	134
<i>Dubovik Alexander Semenovich (1916 – 1999).</i>	140
50 Years of Dedicated Work in MIIGAiK.....	142