

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
РАЗДЕЛ
ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА
№ 6

Журнал основан в июле 1957 года

Выходит шесть раз в год

ИЗДАНИЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ
МОСКВА 2014

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

РАЗДЕЛ ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА

№ 6

Журнал основан в июле 1957 года
Выходит шесть раз в год

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
чл.-корр. РАН, профессор, доктор техн. наук
В.П. САВИНЫХ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Т.В. Верещака
А.П. Гук
И.Г. Журкин
А.П. Карпик
Е.Б. Ключин
В.А. Коугия
А.А. Майоров
(зам. главного редактора)
В.А. Малинников
Ю.И. Маркузе
Ю.М. Нейман
В.И. Павлов
Ю.И. Пимшин
Ю.Г. Якушенков
Х.К. Ямбаев
С.Н. Яшкин

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Зав. редакцией	Е.А. Евтеева
Вед. редактор	К.В. Любомирова
Оригинал-макет	Б.В. Кузнецов
Графика	А.Ю. Боков

105064, Москва,
Гороховский пер., 4
E-mail: redakcia@miigaik.ru
тел. 8 (499) 261-8286
<http://journal.miigaik.ru>
ISSN 0536-101X

Сдано в набор 01.12.2014
Подписано в печать 22.12.2014
Формат 60×90%. Усл. печ. л. 18,00
Тираж 200 экз. Заказ 194
Отпечатано в типографии МИИГАиК
Индекс в каталоге Роспечать 70365

© Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», 2014

УДК 528.28; 528.2; 528:629.78

АСТРОНОМИЯ, ГРАВИМЕТРИЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ

СРАВНЕНИЕ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ЛУНЫ И МАРСА

Профессор, доктор физ.-мат. наук **Р.А. Кащеев**, аспирант **И.О. Новлянская**
Казанский (Приволжский) федеральный университет
sailordragon@rambler.ru

Аннотация. Актуализацией вопросов сравнения и оценки точности моделей гравитационных полей тел Солнечной системы мы обязаны ряду космических исследовательских программ, успешная реализация которых в течение последних лет обеспечила построение многопараметрических моделей гравитационных потенциалов Земли, Луны и Марса. Рассмотрены существующие критерии сравнения моделей и оценки внутренней их точности, представлен краткий обзор современных моделей селено- и ареопотенциалов, а также результаты их анализа.

Ключевые слова: модель гравитационного потенциала, Луна, Марс

Abstract. Successful implementation of a number of research programs focused studying planetary bodies of the solar system had in recent years provided construction of various models of gravitational potential of Earth, Moon and Mars. The existing criteria for comparing models and estimation of their internal accuracy is described, modern models of lunar and martial gravity field and the results of their analysis are briefly overviewed.

Keywords: gravity potential model, Moon, Mars

Применение новых методов и технологий бортовых измерений на фоне возрастания полетной активности в области исследований Земли, Луны и Марса позволило существенным образом детализировать наши знания о структуре гравитационных полей этих небесных тел. Результаты космических проектов CHAMP, GRACE, GOCE, KAGUYA, GRAIL убедительным образом продемонстрировали достоинства дифференциальных методов спутниковых измерений в системах с изменяемой геометрией расположения элементов. В настоящее время исследователям доступны различные модели потенциалов силы притяжения этих тел, отличающиеся друг от друга количеством числовых параметров, источниками и составом исходной наблюдательной информации, методами ее обработки и, как следствие, разнообразием свойств и точностных характеристик.

Растущее число различающихся между собой по целому ряду признаков моделей гравитационного поля тел Солнечной системы, а также перспективы исследования изменений геопотенциала с течением времени актуализировали разработку эффективных методик сравнения моделей друг с другом и построение информативных критериев оценки их точности.

В силу сказанного выше, в данной статье рассматриваются некоторые аспекты сравнения (сопоставления) и оценки точности многопараметрических моделей гравитационного потенциала на примере современных моделей потенциалов силы притяжения Луны и Марса. Универсальность методов космической геодезии и планетной гравиметрии позволяют в дальнейшем распространить обсуждаемые подходы и методики на другие тела Солнечной системы.

Наиболее употребительной формой численно-аналитического описания поля силы притяжения планет земной группы является разложение гравитационного потенциала $V(\rho, \varphi, \lambda)$ в ряд объемных сферических (шаровых) функций

$$V(\rho, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{\rho} \left[1 + \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{\rho} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right], \quad (1)$$

совокупность конечного числа безразмерных гармонических коэффициентов $\{C_{nm}, S_{nm}\}$, ($n=2, 3, \dots, N$; $m=0, 1, \dots, n$) которого (N —размерность модели) представляет собой модель гравитационного поля исследуемого небесного тела.

Ниже дано краткое описание рассматриваемых в настоящей статье моделей гравитационных полей Луны и Марса, опирающееся на данные International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [1].

Модели гравитационного потенциала Луны.

Модель 1 — GLGM-1 (1994). Построена по результатам наземного радиослежения за ИСЛ «Clementine», а также «Lunar Orbiter-1, 2, 3, 4, 5», и субсателлитом КК «Apollo-15». При создании модели было использовано 361 000 наблюдений ИСЛ «Clementine» и 300 000 наблюдений других КА. Гармонические коэффициенты (и их ошибки) в данной модели вычислены до степени и порядка $N=70$.

Модель 2 — JGL165P1 (2000). Данная модель является наиболее информативной моделью, построенной по относящимся к интервалу с 11 января 1998 г. по 30 июля 1999 г. данным наземного радиослежения за ИСЛ «Lunar Prospector». Кроме того, в процессе оценивания параметров модели также использовались материалы ранее реализованных миссий ИСЛ «Lunar Orbiter-1», «Lunar Orbiter-1, 2, 3, 4, 5», «Clementine», субсателлитов КК «Apollo-15» и «Apollo-16». Гармонические коэффициенты и их среднеквадратические ошибки в данной модели приведены до степени и порядка $N=165$.

Модели 3, 4, 5 — SGM75b, SGM90d, SGM100g (2008) соответственно. Перечисленные модели построены по данным, полученным в рамках японской программы KAGUYA (SELENE) и некоторым историческим данным («Lunar Orbiter-1–5», «Apollo-15, 16», «Clementine», «Lunar Prospector» и «SMART-1»). Размерности моделей 3, 4, 5 составляют $N=75, 90, 100$ соответственно.

Модель 6 — GL0660B (2013). Одна из первых предварительных моделей селенопотенциала, построенных по результатам программы GRAIL. При построении модели GL0660B использованы результаты измерений, выполненных по программе GRAIL на интервале с 1 марта по 29 мая 2012 г. Гармонические коэф-

фициенты и их среднеквадратические ошибки в данной модели приведены до степени и порядка $N=660$, что позволяет на поверхности Луны описывать аномалии поля протяженностью от 10 км и более.

Модели гравитационного потенциала Марса.

Модель 1 — GGM50A01 (1998). Построена по данным радиослежения за КА Mariner-9 (49 878 наблюдений) и орбитальных модулей КА Viking-1, 2 (95 370 и 87 075 наблюдений соответственно). Гармонические коэффициенты и их среднеквадратические ошибки в данной модели вычислены до степени и порядка $N=50$.

Модель 2 — GGM2BC80 (2000). Построена по 955 115 наблюдениям КА Mars Global Surveyor. Гармонические коэффициенты и их среднеквадратические ошибки в данной модели вычислены до степени и порядка $N=80$.

Модель 3 — GGM1025A (2002). Построена по 1 625 276 наблюдениям КА Mars Global Surveyor. Гармонические коэффициенты и их среднеквадратические ошибки в данной модели вычислены также до степени и порядка $N=80$.

Модель 4 — JGM85F01 (2002). Построена в результате объединения данных радиослежения за четырьмя КА: Mariner 9 (1971–1972 гг., 47 597 наблюдений), Viking-1 (1976–1978 гг., 67 545 наблюдений), Viking-2 (1977–1978 гг., 70 677 наблюдений), Mars Global Surveyor (1998–2001 гг., 2 382 826 наблюдений). Гармонические коэффициенты и их среднеквадратические ошибки в данной модели вычислены до степени и порядка $N=85$.

Оценка точности многопараметрической модели поля может выполняться по двум взаимодополняющим направлениям:

1) по величинам среднеквадратических ошибок коэффициентов, устанавливаемых в ходе вычислительных процедур их оценивания;

2) по расхождениям значений моделируемых величин (трансформант потенциала) со значениями тех же величин, непосредственно полученными по результатам измерений, не привлекавшихся для оценивания искомых модельных параметров.

В первом случае принято говорить о внутренней точности, отражающей адекватность

использованной модели и качество решения, во втором — о внешней точности, характеризующей реальную погрешность построенной модели.

Обсуждение вопросов *оценки внутренней точности* моделей гравитационных полей Луны и Марса проведем опираясь на величину среднеквадратических ошибок гармонических коэффициентов рассматриваемых нами моделей. В качестве критерия оценки выберем имеющий размерность длины степенной спектр мощности d_n ошибок δC_{nm} и δS_{nm} гармонических коэффициентов одной и той же степени n :

$$d_n = R \sqrt{\sum_{m=0}^n (\delta C_{nm}^2 + \delta S_{nm}^2)}, \quad (2)$$

где R — средний радиус исследуемой планеты.

Критерию (2) размерность длины придана для обеспечения наглядности интерпретации его погрешностью высоты уровенной поверхности гравитационного потенциала, обусловленной влиянием среднеквадратических ошибок гармонических коэффициентов соответствующей степени.

На рис. 1 приведены графики вычисленных по описанным выше моделям селено- и ареопотенциалов соответственно значений меры d_n для различных индексов степени n разложения (1).

Обсуждая рис. 1, *а*, заметим прежде всего, что хронологически наиболее ранние среди рассматриваемых моделей модели 1 и 2 характеризуются значительными ошибками (2–3 м)

в низкочастотной области, постепенно убывающими (до 0,7–0,5 м) с ростом степени гармоник.

С другой стороны, ошибки параметров новейшей модели 6 миссии GRAIL очень малы (не превышают первых сантиметров) и практически не зависят от индекса степени, еле заметно возрастая в области очень высоких частот. Подчеркнем, что высокая точность моделей миссии GRAIL обусловлена применением современных технологий высокоточного межспутникового слежения, выполняемого в системе двух ИСЛ на низких высотах.

Согласно используемому критерию оценки внутренней точности, модели 3, 4, 5 миссии KAGUYA занимают промежуточное положение между моделями 1, 2 и моделью 6: значения критерия d_n по величине невелики (менее 1 м), для низкочастотных гармоник малы, возрастают с увеличением индекса степени. Преимущества этих моделей перед моделями 1 и 2 можно объяснить использованием в рамках программы KAGUYA ретрансляционного субспутеллита RSAT, позволившего выполнять измерения и в периоды нахождения основного орбитального модуля вне зоны прямой видимости для земного наблюдателя, т.е. за телом Луны.

Аналогичные графики для моделей гравитационного потенциала Марса представлены на рис. 1, *б*. Судя по этому рисунку, модель 1 сильно отличается по внутренней точности от трех других моделей 2, 3, 4, которые, в согла-

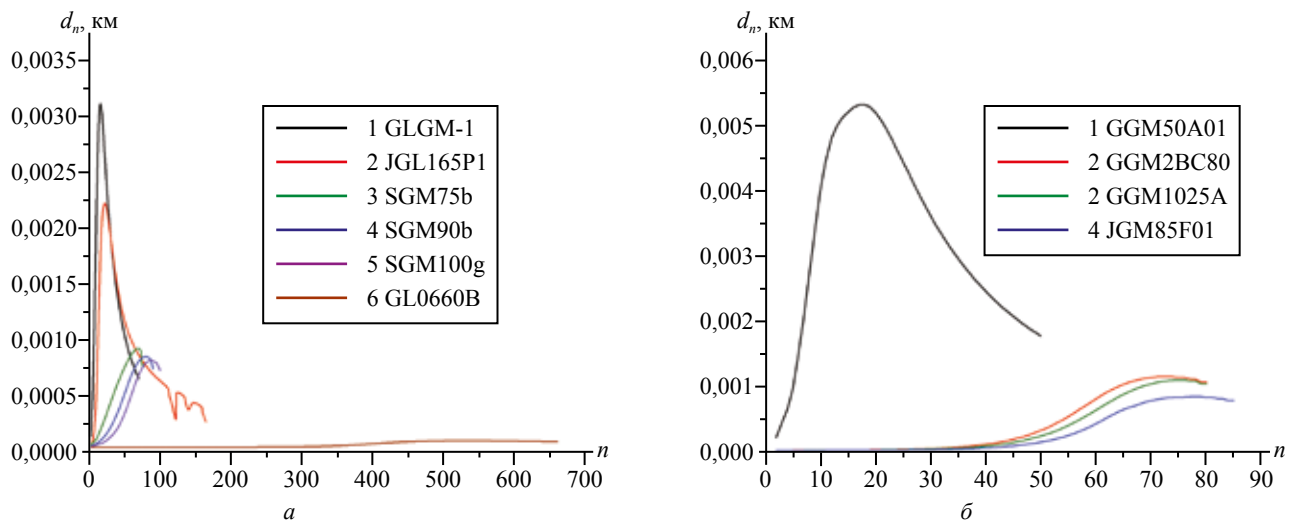


Рис. 1. Зависимость величины d_n от индекса степени n :

а — Луна; *б* — Марс

сии с критерием d_n , оказались очень близкими друг к другу. Значения критерия d_n , а следовательно, и значения ошибок параметров модели 1 быстро растут на интервале изменения индекса степени $n=5-20$ почти до 5,5 м, а затем примерно так же быстро спадают на всем интервале значений индекса n , значительно превосходя ошибки параметров моделей 2, 3, 4. Значения среднеквадратических ошибок гармонических коэффициентов модели 2 на интервале $n=40-75$ чуть больше, чем у модели 3, а у моделей 2 и 3 чуть больше, чем у модели 4. Однако даже при $n=70$ ошибки этих трех моделей не превосходят 1 м, тогда как до $n=50$ эти ошибки не превышают первых десятков сантиметров.

Сопоставление (сравнение) различных моделей гравитационного потенциала исследуемого тела между собой возможно следующими тремя взаимодополняющими способами:

сопоставление значений пар отдельных коэффициентов с одними и теми же индексами степени и порядка двух сравниваемых моделей [2];

сопоставление наборов $2n+1$ коэффициентов каждой степени n по некоторому заранее установленному степенному критерию [3].

Здесь наиболее очевидными и потому широко используемыми критериями являются:

безразмерная степенная мера расхождения моделей Δ_n , характеризующая среднеквадратические различия коэффициентов одной и той же степени и порядков

$$\Delta_n = \frac{1}{2n+1} \sum_{m=0}^n [(C_{nm} - C'_{nm})^2 + (S_{nm} - S'_{nm})^2];$$

безразмерная степенная мера r_n согласия моделей, имеющая смысл коэффициента линейной корреляции $(2n+1)$ -мерных векторов, образуемых гармоническими коэффициентами n -й степени сравниваемых моделей

$$r_n = \frac{\sum_{m=0}^n C_{nm} C'_{nm} + \sum_{m=1}^n S_{nm} S'_{nm}}{\sqrt{\sum_{m=0}^n (C_{nm}^2 + S_{nm}^2) \sum_{m=0}^n (C'_{nm}^2 + S'_{nm}^2)}} \quad \text{— сопостав-$$

ление наборов всей совокупности коэффициентов сравниваемых моделей;

$$\Delta = \frac{1}{N-1} \sum_{n=2}^N \sqrt{\frac{1}{2n+1} \sum_{m=0}^n [(C_{nm} - C'_{nm})^2 + (S_{nm} - S'_{nm})^2]};$$

$$r_n = \frac{\sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n C_{nm} C'_{nm} + \sum_{n=2}^N \sum_{m=1}^n S_{nm} S'_{nm}}{\sqrt{\sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (C_{nm}^2 + S_{nm}^2) \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (C'_{nm}^2 + S'_{nm}^2)}} \quad \text{— со-}$$

поставление вычисляемых по сравниваемым моделям значений тех или иных заранее выбранных трансформант потенциала, получаемых в результате суммирования всех членов соответствующего ряда.

Для большей наглядности это сопоставление предпочтительнее проводить в терминах высот уровенной поверхности гравитационного потенциала (геоида, селеноида, ареоида и т.д.) по отношению к заранее выбранной отсчетной поверхности.

Сопоставление численных значений гармонических коэффициентов разложения гравитационных потенциалов Луны и Марса в рамках настоящего исследования выполнялось исходя из критерия интегрального изменения высоты поверхности селеноида (или ареоида) вследствие различия пар значений конкретного коэффициента (для каждого значения индексов степени и порядка) при переходе от одной модели поля к другой. Иными словами, для каждой пары сравниваемых моделей определялось характеризующее меру их близости число коэффициентов, различия которых вызывают превышающие заданные пороговые значения различия в высотах селеноида и ареоида [2].

Луна. Число и доля гармонических коэффициентов C_{nm} и S_{nm} , различия которых в паре сравниваемых моделей селенопотенциала приводят к изменению превышения селеноида на величину, превышающую пороговые значения 5, 10, 20, 30, 50 см и 1 м (табл. 1).

Марс. Число и доля гармонических коэффициентов C_{nm} и S_{nm} , различия которых в паре сравниваемых моделей ареопотенциала приводят к изменению превышения ареоида на величину, превышающую пороговые значения 5, 10, 20, 30, 50 см и 1 м (табл. 2).

В результате расчетов для моделей потенциалов Луны и Марса для каждого порогового значения установлено количество коэффициентов, разность которых ведет к превышению соответствующего порогового значения, характеризующего интегральные отличия фигур селеноидов (см. табл. 1) или, соответственно, ареоидов (см.

Таблица 1

			Число коэффициентов C_{nm} и S_{nm} / доля в процентах					
			5 см	10 см	20 см	30 см	50 см	1 м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-1	5106	70	3976 / 77,87	3031 / 59,36	1745 / 34,18	1119 / 21,92	544 / 10,65	143 / 2,80
3-1	5106	70	4146 / 81,20	3343 / 65,47	2146 / 42,03	1442 / 28,24	740 / 14,49	191 / 3,74
3-2	5846	75	4062 / 69,48	2713 / 46,41	1276 / 21,83	704 / 12,04	247 / 4,23	17 / 0,29
4-1	5106	70	4194 / 82,14	3451 / 67,59	2239 / 43,85	1426 / 27,93	659 / 12,91	165 / 3,23
4-2	8366	90	5426 / 64,86	3273 / 39,12	1249 / 14,93	598 / 7,15	160 / 1,91	9 / 0,11
4-3	5846	75	3905 / 66,80	2368 / 40,51	743 / 12,71	227 / 3,88	23 / 0,39	0 / 0,00
5-1	5106	70	4211 / 82,47	3460 / 67,76	2178 / 42,66	1400 / 27,42	639 / 12,51	169 / 3,31
5-2	10296	100	5927 / 57,57	3174 / 30,83	1129 / 10,97	537 / 5,22	155 / 1,51	7 / 0,07
5-3	5846	75	4027 / 68,88	2475 / 42,34	840 / 14,37	273 / 4,67	34 / 0,58	0 / 0,00
5-4	8366	90	4032 / 48,20	1606 / 19,20	174 / 2,08	18 / 0,22	0 / 0,00	0 / 0,00
6-1	5106	70	5105 / 99,98	3402 / 66,63	2150 / 42,11	1381 / 27,05	641 / 12,55	167 / 3,27
6-2	27716	165	8611 / 31,07	3273 / 11,81	1083 / 3,91	528 / 1,91	151 / 0,54	7 / 0,03
6-3	5846	75	3997 / 68,37	2447 / 41,86	833 / 14,25	299 / 5,11	38 / 0,65	0 / 0
6-4	8366	90	4353 / 52,03	1901 / 22,72	219 / 2,62	17 / 0,2	0 / 0	0 / 0
6-5	10296	100	2496 / 24,24	550 / 5,34	25 / 0,24	1 / 0,01	0 / 0	0 / 0

Таблица 2

			Число коэффициентов C_{nm} и S_{nm} / доля в процентах					
			от 5 см	от 10 см	от 20 см	от 30 см	от 50 см	от 1 м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-1	2646	50	2258 / 85,34	1954 / 73,85	1397 / 52,8	1030 / 38,93	558 / 21,09	121 / 4,57
3-1	2646	50	2255 / 85,22	1935 / 73,13	1391 / 52,57	1024 / 38,7	536 / 20,26	120 / 4,54
3-2	6636	80	1491 / 22,47	365 / 5,5	47 / 0,71	15 / 0,23	6 / 0,09	4 / 0,06
4-1	2646	50	2272 / 85,87	1963 / 74,19	1418 / 53,59	1059 / 40,02	568 / 21,47	130 / 4,91
4-2	6636	80	1642 / 24,74	529 / 7,97	51 / 0,77	14 / 0,21	2 / 0,03	1 / 0,02
4-3	6636	80	1781 / 26,84	576 / 8,68	78 / 1,18	29 / 0,44	12 / 0,18	4 / 0,06

табл. 2), построенных по коэффициентам сравниваемых моделей. В первой графе табл. 1 и 2 указаны пары сравниваемых моделей, во второй — число пар сравниваемых гармонических коэффициентов этих моделей, в третьей — приведены значения максимального индекса степени сравниваемых коэффициентов.

Анализируя представленные в табл. 1 результаты сопоставления шести моделей гравитационного потенциала Луны, приходим к следующим выводам. Модели 3, 4, 5, построенные по данным миссии KAGUYA, отличаются высоким качеством, о чем можно судить по рис. 1, однако, заметно различаются между собой. Сравнение моделей 3, 4, 5 с моделью 6 миссии GRAIL показывает, что наибольшим сходством с моделью 6 обладает модель 5, затем 4 и лишь затем 3. Различие моделей 3, 4, 5 друг с другом по интегральному критерию расхождения высот селеноида не превышает 30 см, в среднем составляя около 10 см.

Модель 1, самая ранняя из рассмотренных нами, хуже согласуется с последней по хронологии моделью 6, чем модели 3, 4, 5. По срав-

нению с 1, модель 2 существенно ближе и к моделям 3, 4, 5, и к модели 6. Любопытно, что при этом уровень согласия модели 2 с моделью 6 выше, чем уровень согласия с моделью 6 моделей 3, 4, 5.

Табл. 2 отражает уже отмеченные нами выше значительные отличия модели 1 от прочих рассматриваемых здесь моделей ареопотенциала. Модели 2, 3, 4 оказались чрезвычайно близки, несмотря на существенное различие числа использованных при их создании измерений. Различие моделей 2, 3, 4 друг с другом по интегральному критерию расхождения высот ареоида практически не превышает 20 см, в среднем составляя менее 5 см.

В качестве других характеристик близости пар рассмотренных моделей селено- и ареопотенциалов в работе использованы описанные выше безразмерная степенная мера расхождения моделей Δ_n , характеризующая среднеквадратические различия коэффициентов одной и той же степени и порядков (рис. 2), и безразмерная степенная мера r_n согласия моделей (рис. 3). При вычислении степенных мер Δ_n и r_n в качестве

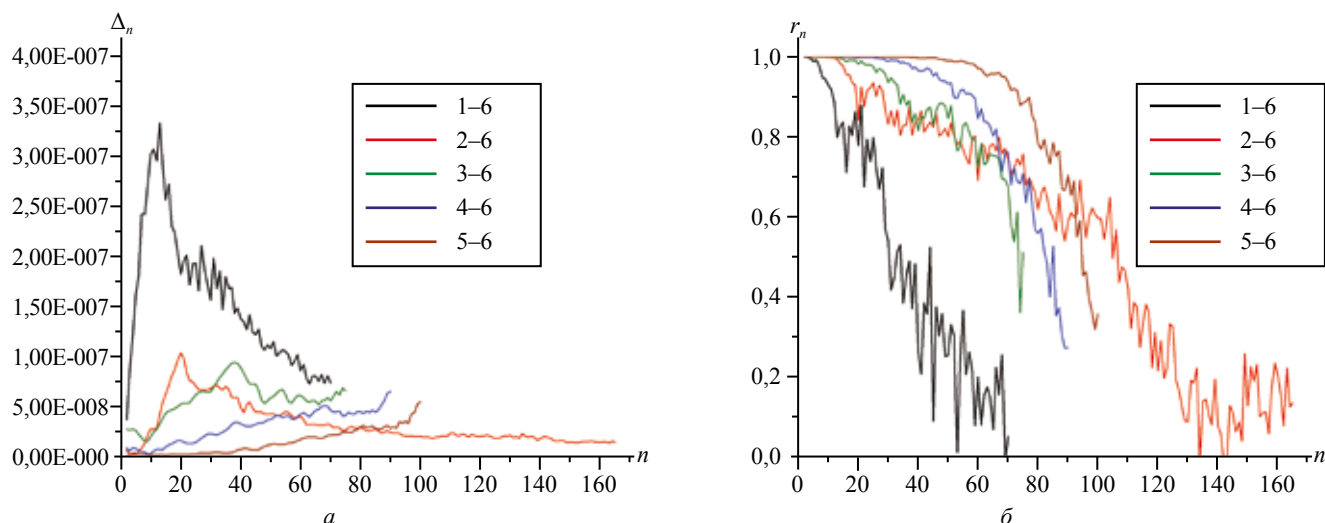


Рис. 2. Луна: зависимость степенной меры Δ_n (а) и r_n (б) от степени n при сопоставлении моделей 1, 2, 3, 4, 5 с моделью 6 селенопотенциала

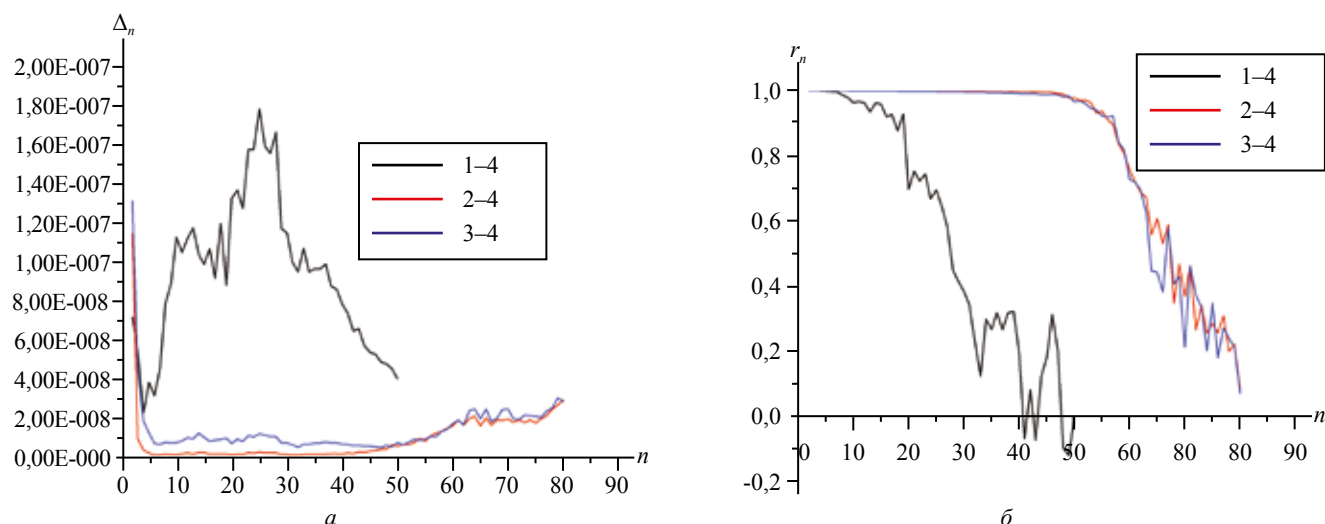


Рис. 3. Марс: зависимость степенной меры Δ_n (а) и r_n (б) от степени n при сопоставлении моделей 1, 2, 3 с моделью 4 ареопотенциала

эталонной модели, с которой сравнивались все остальные, нами были выбраны модель 6 для Луны и модель 4 для Марса.

Представленные на рис. 2, акривые описывают зависимости степенных среднеквадратических разностей Δ_n коэффициентов исследуемых моделей селенопотенциала с коэффициентами модели 6, демонстрируя хорошее согласие моделей 2, 3, 4, 5 с моделью 6 практически на всем диапазоне изменения значений индекса степени n . Модель 1 существенно отличается от модели 6, особенно, в низкочастотной области (при $n > 40$). Значения критерия согласия Δ_n моделей 3, 4, 5 с моделью 6 позволяют заметить их возрастание по мере увеличения числа мо-

дельных параметров: модель 5 лучше согласуется с 6, чем модели 4 и 3, а модель 4 лучше, нежели 3.

Судя по рис. 2, б, поведение степенных коэффициентов r_n подтверждает вывод о близости моделей 3, 4, 5 к модели 6 и друг к другу, по сравнению с отличающейся от них модели 1, чья корреляция с моделью 6 заметно хуже для всех n . Модель 2 коррелирует с моделью 6 на уровне модели 3, чья корреляция с моделью 6 слабее, нежели моделей 4 и 5.

Осциллирующий характер зависимостей, приобретаемый кривыми при $n > 15$, по-видимому, отражает усиление влияния шумовой компоненты в значениях оценок гар-

монических коэффициентов средне- и высокочастотной составляющих моделей селенопотенциала.

Рис. 3 подтверждает сделанный ранее вывод о значительном различии модели 1 гравитационного потенциала Марса, с одной стороны, и моделей 2, 3, 4, с другой. Заметим также, что согласно использованным критериям, три последние модели, построенные по данным слежения за КА Mars Global Surveyor, оказываются практически неразличимыми до $n=50$ и достаточно близкими друг к другу для более высоких степеней.

Подводя общие итоги, выскажем некоторые рекомендации в части продолжения исследований. Во-первых, представляется полезной и целесообразной разработка новых более чувствительных критериев оценки меры близости моделей потенциала между собой. Во-вторых, необходимо создание методики и анализ критериев исследования внешней точности (оценки качества) моделей. Подчеркнем в этой связи, что результаты миссии GRAIL, благодаря

их беспрецедентной точности и разрешению, обеспечили реальные перспективы получения моделей селенопотенциала чрезвычайно высокого качества. Возможно предположить, что эти модели в течение длительного времени будут использоваться как эталонные, в том числе и для верификации разрабатываемых критериев сравнения и оценки точности моделей гравитационных потенциалов тел Солнечной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.
2. Кащеев Р.А. Сопоставление моделей гравитационного поля Земли, построенных по данным межспутникового слежения. // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2008. – № 2. – С.101–110.
3. Аким Э.Л., Бажин И.К., Павлов В.П., Почукаев В.Н. Поле тяготения Луны и движение ее искусственных спутников. М.: Машиностроение, 1984. – 288с.

Принята к печати 2 апреля 2014 г.

СПУТНИКОВОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ, ГРАВИСТИКА И ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Профессор, доктор техн. наук Н.Д. Дроздов

Государственный университет по землеустройству, Москва
тел. 8(903)555 53 92

Аннотация. На базе разработанной автором альтернативной теории внешнего гравитационного поля Земли (гравистики) решается задача получения геодезических и динамических параметров в точках реального земного поля по значениям их прямоугольных координат, полученных путём спутникового позиционирования.

Ключевые слова: спутниковое позиционирование, геометрические и динамические параметры земного поля

Abstract. On the basis of the alternate theory of an external gravitational field of the Earth developed by the author (gravistics), a task of reception of geodetic and dynamic parameters in points of real terrestrial field by values of their rectangular coordinates received by satellite positioning is solved.

Keywords: satellite positioning, geometrical and dynamic parameters of a terrestrial field

Классическая глобальная (высшая) геодезия в конечном итоге преследовала чисто геометрическую цель — определение единых пространственных геодезических координат точек земной поверхности, т.е. описание топографической поверхности Земли хотя бы на отдельных, но обширных её территориях. Исходным материалом для этого служили результаты наземных измерений по необходимости структурированных в обширные астрономо-геоде-

зические сети. Такие измерения, естественно, проводятся в поле силы тяжести на Земле относительно уровней такого поля — уровней горизонта на каждом наблюдаемом пункте. И потому геометрическое положение таких пунктов, естественно, определялось относительно некоторого идеализированного (нормального) уровня. За таковой изначально принималась поверхность некоторого двухосного эллипсоида (сфероида), аппроксимирующего хотя бы

на территории проведения астрономо-геодезических работ равновесный уровень мирового океана — геоид. Это то, что называют референц-эллипсоидами.

В связи с этим формировался известный комплекс задач, составляющий предмет высшей геодезии: определение параметров референц-эллипсоида по результатам астрономо-геодезических измерений, его ориентирование в теле Земли, проектирование пунктов и результатов измерений на такой сфероид, математическая обработка на нём полученных результатов с целью получения поверхностных координат (геодезические широты B и долготы L) пунктов этих сетей и их геодезические высоты H . При этом необходимо было использовать не только геометрические характеристики поля сил тяжести, т.е. уровни его горизонта, но и его динамические характеристики — сами силы — для проектирования измерений на земной поверхности на референц-эллипсоид и нахождения геодезических высот пунктов АГС. Для решения этих задач была разработана теория Стокса–Молоденского, основанная на классической теории Стокса и затем существенно обобщённой Молоденским теорией потенциала.

Таким образом, в условиях наземных астрономо-геодезических измерений использование полевых характеристик сил тяжести на Земле выглядит в классической геодезии лишь неизбежным средством достижения геометрического описания поверхности Земли. Но при этом тесная привязка такого описания хотя бы и к идеализированной сфероидической модели земного поля тяжести, т.е. к той или иной геодезической системе координат, была и остаётся наиболее приемлемой для практического их использования в тех же земных условиях.

Но современное спутниковое позиционирование даёт возможность геометрического описания земной поверхности в виде непосредственно измеряемых пространственных координат (x, y, z) её точек в общеземной декартовой координатной системе. В связи с этим большая часть теоретических разработок и практических средств классической геодезии теряет свою актуальность. По существу этот материал может вызывать интерес теперь и тем более в дальнейшем лишь с позиции изучения истории становления и развития глобальной

общеземной геодезии. Соответственно встаёт вопрос о необходимой переориентации целей, научных идей и практических методов того, что в этих новых условиях можно было бы по-прежнему называть геодезией в глобальных масштабах.

В данной статье рассматриваются некоторые возможности, представляемые в этом плане гравистикой, теоретические обоснования которой изложены в работе [1]. Поскольку все жизненные и технические процессы на Земле происходят не просто в геометрическом пространстве, а в поле действия сил тяжести, актуальной целью глобальной геодезии теперь должен стать обратный переход от чисто геометрических характеристик земной поверхности, получаемых позиционированием, к полевым характеристикам на Земле и в околоземном пространстве.

В гравистике поля сил, как тяжести, так и притяжения, по-прежнему представляются в виде сумм неких основных (нормальных) и слабых аномальных полей. При этом, как и в классической геодезии, за нулевой нормальный изоуровень сил тяжести рассматривается S_0 -сфероид, аппроксимирующий геоид. Этот S_0 -сфероид является аналогом общего земного эллипсоида классической теории. Математически его легко получить по координатам (x, y, z) представительной выборки точек на геоиде. Эту выборку можно составить, например, из наземных береговых точек материков и океанических островов.

Итак, первоначальная задача состоит в определении большой a_0 и малой b_0 полуосей S_0 -сфероида или одной из них и эксцентриситета $e_0^2 = \frac{a_0^2 - b_0^2}{a_0^2}$ по значениям $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ координат точек $\bar{M}$ выборки. Это чисто геометрическая задача.

Для её решения от этих координат $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ следует перейти к сферическим координатам — радиус-векторам

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{r}^2 + \bar{z}^2}, \quad (1)$$

где $\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$.

Центральные широты Φ выборочных точек, определяются уравнениями

$$\cos \Phi = \bar{r}/\bar{R} \text{ или } \sin \Phi = \bar{z}/\bar{R}. \quad (2)$$

Значения же долгот этих точек определяются уравнениями

$$\cos L = \bar{x}/\bar{r} \text{ или } \sin L = \bar{y}/\bar{r}. \quad (3)$$

В свою очередь, из уравнений сфероидов в той же общеземной координатной системе

$$\begin{cases} x = a_0 \cos V \cos L; \\ y = a_0 \cos V \sin L; \\ z = a_0 \sqrt{1 - e_0^2} \sin V, \end{cases}$$

где V — приведенные широты его точек M , следует, что для них

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} = a_0 \cos V; \\ R &= \sqrt{r^2 + z^2} = a_0 \sqrt{1 - e_0^2 \sin^2 V}; \\ \cos \Phi &= \frac{r}{R} = \frac{\cos V}{\sqrt{1 - e_0^2 \sin^2 V}}. \end{aligned}$$

Отсюда вытекает, что

$$\begin{aligned} \sin V &= \frac{\sin \Phi}{\sqrt{1 - e_0^2 \cos^2 \Phi}}; \\ R &= \frac{a_0 \sqrt{1 - e_0^2}}{\sqrt{1 - e_0^2 \cos^2 \Phi}} = \frac{b_0}{\sqrt{1 - e_0^2 \cos^2 \Phi}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее точкам $\bar{M}_i$ выборки сопоставим точки M_i сфероидов с теми же центральными широтами Φ_i и долготами L_i и радиус-векторами

$$R_i = \bar{R}_i + \delta R_i = \frac{\bar{b}_0 + \delta b}{\sqrt{1 - (\bar{e}_0^2 + \delta e^2) \cos^2 \Phi_i}}, \quad (5)$$

где $\bar{b}_0$ и $\bar{e}_0^2$ — некоторые приближенные значения параметров b_0 и e_0^2 сфероидов. В них следует внести поправки δb и δe^2 , ведущие к поправкам δR_i в значения $\bar{R}_i$ точек $\bar{M}_i$ выборки для получения значений R_i отвечающих им точек M_i сфероидов. При этом сфероид с параметрами b_0 и e_0^2 аппроксимирует геоид, т.е. является S_0 -сфероидом, если поправки δb и δe^2 определяются под условием $\sum_i \delta R_i^2 = \min$. Для этого путём линеаризации функций (5) приходим к следующему линейному выражению величин δR_i через δb и δe^2 :

$$\begin{aligned} \delta R_i &= \frac{\bar{R}_i}{\bar{b}_0} \delta b + \frac{\cos^2 \Phi_i}{2\sqrt{1 - \bar{e}_0^2 \cos^2 \Phi_i}^3} (b_0 \delta e^2) - \\ &- \left(\bar{R}_i - \frac{\bar{b}_0}{\sqrt{1 - \bar{e}_0^2 \cos^2 \Phi_i}} \right). \end{aligned}$$

За приближенные значения $\bar{b}_0$ и $\bar{e}_0^2$ можно взять любые уже известные каталожные значения, например, $\bar{b} = 6\,356\,752$ м, $e_0^2 = 0,006\,694\,380$ из системы WGS-84. Правда, можно ожидать, что в пределах точности определения значений $\bar{R}_i$ полученные значения $b_0 = \bar{b}_0 + \delta b$ и $e_0^2 = \bar{e}_0^2 + \delta e^2$ не будут значительно отличаться от их значений в системе WGS-84. Но это отнюдь не делает ненужной, излишней предлагаемую дорогостоящую работу по позиционированию разбросанных по всему уровню мирового океана выборочных точек.

В самом деле, если бы такие точки $\bar{M}_i$ действительно все принадлежали геоиду и если бы их радиус-векторы $\bar{R}_i$ были определены точно, то полученные величины $\delta R_i = R_i - \bar{R}_i$ выражали бы радиальные отклонения точек M S_0 -сфероидов как уровня нормального поля сил тяжести от отвечающих им точек $\bar{M}$ геоида — уровня реального поля сил тяжести. Иначе говоря, значения δR_i определяли бы радиус-векторы точек изоуровня аномального поля сил тяжести. Это важная информация для описания реальных полей сил как тяжести, так и притяжения. Здесь важно отметить, что поле сил тяжести реально определено только на теле Земли как на вращающейся платформе. Поэтому в гравитике речь идёт о некотором Z -поле — математическом расширении такого реального поля на всё пространство. Это Z -поле рассматривается как наложение поля центробежных сил на так называемое G -поле. В гравитике доказано математическое существование такого гармонического поля, определённого всюду, кроме множества нулевого объёма его математических источников, и такого, что всюду вне притягивающих масс оно полностью совпадает с физически реальным полем земного притяжения. При этом поле центробежных сил полагается математически определённым в общеземной системе координат формулой

$$\vec{\gamma}_c = \omega^2 (x\vec{i} + y\vec{j}) \quad (6)$$

во всём пространстве, хотя физический смысл эта формула имеет лишь на вращающемся с угловой скоростью ω теле Земли.

Так что Z -поле математически определено всюду как на теле Земли, так и в околоземном пространстве, хотя реальным полем сил $\vec{g}$ тяжести оно является только на земной поверхности и всём, что вращается вместе с ней вокруг оси мира с той же угловой скоростью $\vec{\omega}$. Соответственно под геоидом в гравитике понимается Z -геоид — уровенная поверхность Z -поля, определённая в том числе и под материками. В океанической же части Земли она, как уже сказано, мыслится совпадающей с некоторой идеальной невозмущённой поверхностью мирового океана.

В гравитике доказано, что такой Z -геоид является аналитической поверхностью. Из этого следует, что в таких идеальных условиях значения аномалии δR_i можно уверенно интерполировать на весь S_0 -сфероид в виде функции $\delta R(\Phi, L)$ сферических координат (Φ, L) его точек. Эту функцию можно получить по выборочным значениям $\delta R(\Phi_p, L_i)$, например, в виде разложения в тригонометрический ряд по сферическим функциям этих координат.

Однако в реальности, во-первых, океаническая поверхность в некоторой мере отличается от изоуровня сил тяжести (рельеф мирового океана). Во-вторых, эмпирически полученные значения R_i отягчены разного рода искажениями и ошибками. В итоге полученная по ним функция $\delta \bar{R}(\Phi, L)$, строго говоря, утрачивает свойство аналитичности. В полученном разложении возникают шумовые гармоники. В результате их фильтрации и получается аналитическая функция $\delta R(\Phi, L)$ радиальной аномалии Z -геоида как поверхности идеального уровня мирового океана, распространённого на всю Землю с её материками. С другой стороны, отфильтрованная часть $\delta \bar{R}(\Phi, L) - \delta R(\Phi, L)$ может быть весьма информативной для океанологии и геофизики. Эти вопросы требуют своей разработки.

Итак, рассмотренным путём можно получить лишь один изоуровень Z -поля — Z -геоид. Между тем материковые точки в основной своей массе лежат на разных его изоуровнях. Так

что геодезию должно интересовать всё Z -поле со всеми его изоуровнями, охватывающими все точки земной поверхности вплоть до вершины Эверест.

Что же касается G -поля, совпадающего вне притягивающих масс с реальным полем земного притяжения, в гравитике доказано, что оно как поле гармоническое всюду вплоть до множества своих математических источников определяется именно всего лишь какой угодно одной его изоповерхностью и его мощностью $k = GM = 398\,600,44 \text{ км}^3/\text{с}^2$ (теорема восстановления). Оно имеет свою экваториальную плоскость и свой центр (центральная теорема гравитики [2]). В силу всего этого в гравитике, в отличие от классической теории, теоретически главенствующую роль играет не поле сил тяжести, а поле сил притяжения. Поле же сил тяжести, как уже сказано, рассматривается как наложение на поле притяжения центробежных сил, т.е. как жизненно важная на Земле, но математически производная конструкция.

G -поле также имеет смысл представить в виде суммы нормального и аномального полей. При этом за нормальное в гравитике обоснованно принято сфероидное гармоническое поле с той же, что и у самого G -поля, мощностью k . Его изоуровнями являются софокусные сфероиды с общим фокальным кругом радиуса p . Их общую экваториальную плоскость и общий центр естественно считать совмещёнными с экваториальной плоскостью и центром G -поля. При таком условии это сфероидное поле названо Γ -полем. В остальном оно полностью определяется двумя параметрами k и p .

Далее за нормальную часть Z -поля естественно было бы принять наложение поля (6) центробежных сил на Γ -поле. Но изоуровни получающегося таким образом $\dot{S}$ -поля оказываются математически достаточно сложными, хотя и весьма близкими по геометрической форме к сфероидам. В связи с этим в гравитике за нормальное S -поле сил тяжести обоснованно принята система $S(k, \omega, p)$ S -сфероидов, одним из которых является уже рассмотренный S_0 -сфероид. Параметры a_s и e_s^2 таких S -сфероидов связаны с параметрами k и p Γ -поля и с галактической угловой скоростью $\omega = 7,292\,115 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ уравнением

$$\left(1 + \frac{e_s^2}{2} + \frac{A}{4}\right)(e_s^2 - e_e^2) = A, \quad (7)$$

$$\text{где } A = \frac{\omega^2 a_s}{k/a_s^2}; \quad e_e^2 = \left(\frac{p}{a_s}\right)^2.$$

Эта связь позволяет распространить в первую очередь нормальное поле сил тяжести (S -поле) с одного S_0 -сфероид на всё пространство. Сначала с её помощью можно определить значение параметра p по указанным значениям k и найденным значениям $a_s = a_0$ и e_s^2 S_0 -сфероид.

Так, если взять $a_0 = 6\,378\,130$ м и $e_0^2 = 0,006694380$ из каталога WGS-84, то $A = 0,003461392$ и, соответственно, $e_0^2 - e_e^2 = 0,003446872$. Так что $e_e^2 = 0,003247508$ и $p = a_0 e_0 = 363470,33$ м.

Далее, решая систему четырёх уравнений

$$a_s = R \sqrt{\frac{1 - e_s^2 \cos^2 \Phi}{1 - e_e^2}};$$

$$e_s^2 = \left(\frac{p}{a_s}\right)^2;$$

$$A_s = \frac{\omega^2 a_s}{k/a_s^2};$$

$$A_s = \left(1 + \frac{e_s^2}{2} + \frac{A_s}{4}\right)(e_s^2 - e_e^2)$$

с четырьмя неизвестными a_s , e_s^2 , e_e^2 и A_s при известных значениях k , ω и p , можно определить параметры a_s и e_s^2 S -сфероид, проходящего через ту или иную точку $\bar{M}$ земной поверхности со сферическими координатами R и Φ . При этом получается также значение параметра e_e^2 , связующего такой S -сфероид с Γ -полем.

Для примера положим, что на земной поверхности есть точка $\bar{M}$ с $R = 6\,367\,929,37$ м и $\cos^2 \Phi = \sin^2 \Phi = 0,5$. При указанных ранее значениях k , ω и найденном значении p решение такой системы приводит к значениям $a_s = 6\,376\,650,00$ м, $e_s^2 = 0,006694682$ и $e_e^2 = 0,003247\,986$ параметров S -сфероид, проходящего через эту точку.

При этом по формуле (4) определяется приведенная широта V_s

$$\sin^2 V_s = \frac{\sin^2 \Phi}{1 - e_s^2 \cos^2 \Phi} = 0,501679292$$

и по известной формуле — геодезическая широта B_s

$$\sin^2 B_s = \frac{\sin^2 V_s}{1 - e_s^2 \cos^2 V_s} = 0,503358546.$$

Они определяют положение нашей точки на этом S -сфероиде.

Пренебрегая весьма малой кривизной силовой линии S -поля, полученную широту B_s можно считать геодезической широтой B_0 проекции M нашей точки $\bar{M}$ на S -сфероид. А так как точки $\bar{M}$ и M лежат на общем меридиане своих S -сфероидов, то геодезическая долгота L_0 этих точек определяется формулами (3). Это то, что являлось труднодостижимой и, по существу, итоговой целью классической геодезии. Естественно, в земных условиях такая геодезическая система определения планового положения земных пунктов, скорее всего, останется во многих отношениях предпочтительной всегда. Так что рассмотренный путь перехода от общеземных прямоугольных координат к геодезическим вполне актуален для современной геодезии.

Что же касается задания высотного положения наземных точек, то классическая геодезия, не имея полного описания даже нормального поля сил тяжести, использует целую систему разных высот для одних и тех же точек. В гравитике все они могут быть получены по значениям параметров a_0 , e_0^2 и a_s , e_s^2 S_0 - и S -сфероидов и по широте Φ этих точек. Однако практически в качестве их высотных характеристик предпочтительнее рассматривать просто разность $\Delta a_s = a_s - a_0$. Ведь все точки с одинаковыми её значениями лежат на одном S -сфероиде, т.е. на одном нормальном гидроуровне независимо от их широты. А их высоты, используемые в классической геодезии, различны для их разных широт (эффект непараллельности таких сфероидов). И в этом случае вода не потечёт от больших высот в нижних широтах к меньшим высотам в верхних широтах. Возможно даже обратное течение. В связи с этим величину Δa можно считать нормальной *уровенной высотой* всех точек, через которые проходит соответствующий S_0 -сфероид. В нашем примере такая высота точки M над S_0 -сфероидом с большой полуосью $a_0 = 6\,378\,137$ м (система WGS-84) равна $\Delta a_s = 513,00$ м. В этом можно видеть ту функ-

цию спутникового позиционирования, которая в классической геодезии возлагается на нивелирные работы.

Однако разные точки, лежащие на одном S -сфероиде, могут оказаться на разных Z -уровнях. Так что полученные нормальные уровенные высоты необходимо исправить за аномалии Z -поля. Из гравитики следует, что функция $\delta R(\Phi, L)$ радиальных аномалий Z -геоида даёт полную возможность сделать это. Для этого, во-первых, решая систему двух уравнений

$$\bar{a} = R \sqrt{\frac{1 - \bar{e}^2}{1 - \bar{e}^2 \cos^2 \Phi}};$$

$$\bar{e}^2 = \left(\frac{p}{\bar{a}} \right)^2,$$

получаем значения параметров $\bar{a}$ и $\bar{e}^2$ Γ -сфероида, проходящего через данную точку $\bar{M}$ с известными координатами R и Φ . Значение приведенной широты V этой точки на таком Γ -сфероиде определяется из уравнения

$$\sin^2 V = \frac{\sin^2 \Phi}{1 - \bar{e}^2 \cos^2 \Phi}.$$

При значениях R , Φ и p в нашем примере такое решение приводит к значениям $\bar{a} = 6373122,26$ м; $\bar{e}^2 = 0,003252621$; $\sin^2 V = 0,500814480$; $\cos^2 V = 0,499185520$.

Далее следует спроектировать нашу точку $\bar{M} \in S$ вдоль проходящей через неё силовой линии Γ -поля в точку $M_0 \in S_0$ и получить параметры a и e^2 проходящего через неё Γ_0 -сфероида.

Так как силовые линии Γ -поля — это линии постоянных в нём долгот L и приведенных широт V , то, решая систему двух уравнений

$$(1 - e_e^2 + e_0^2 \sin^2 V_0 - \sigma^2) \sigma^2 = (e_e^2 - e_0^2) \sin^2 V_0;$$

$$\cos^2 V_0 = (1 - \sigma^2) \cos^2 V$$

с известными нам значениями e_e^2 , e_0^2 и полученным значением V , найдём значения приведенной широты V_0 точки M_0 на S_0 -сфероиде и переходного от Γ_0 -сфероида к S_0 -сфероиду параметр σ^2 . В нашем примере получаем $\cos^2 V_0 = 0,498320915$ и $\sigma^2 = 0,001732031$. Искомые же значения $a = a_0 \sqrt{1 - \sigma^2} = 6372618$ м и $e^2 = \frac{e_e^2}{1 - \sigma^2} = 0,003253143$. Кроме того, можно

получить центральную широту Φ_0 точки M_0

$$\cos^2 \Phi_0 = \frac{\cos^2 V_0}{1 - e_0^2 \sin^2 V_0} = \frac{\cos^2 V}{1 - e^2 \sin^2 V} = 0,500000131,$$

которая, как видим, практически совпадает с широтой $\cos^2 \Phi = 0,5$ радиальной проекции точки $\bar{M} \in S$ на S_0 -сфероид. В силу этого высота h точки $\bar{M} \in S$ над точкой $M_0 \in S_0$ пренебрежимо мало отличается по модулю от её радиального отклонения от S_0 -сфероида, но противоположна по знаку. В равной мере это относится к радиальным отклонениям δR точек Z -уровней от согласованных с ними S -сфероидов, в частности, Z -геоида от S_0 -сфероида.

При наличии функции $\delta R(\Phi, L)$ радиальной аномалии Z -геоида по найденным значениям Φ_0 (впрочем, достаточно взять значение Φ) и $L_0 = L$ находим высотную аномалию $\Delta h = -\delta R(\Phi_0, L_0)$ в точке M_0 на уровне S_0 -сфероида.

В гравитике показано, что ей отвечает высотная аномалия $\bar{\Delta h} = (a/\bar{a})^2 \Delta h$ в точке $\bar{M}$ на уровне S -сфероида.

При значениях больших полуосей $\bar{a}$ и a Γ -сфероидов, полученных в нашем примере, $\bar{\Delta h} = 0,99984 \Delta h$. Например, при $\Delta h = -200$ м получаем $\bar{\Delta h} = -199,97$ м, т.е. на 3 см по модулю меньше Δh .

Это значит, что изоуровень G -поля, согласованный с Γ -сфероидом, проходящим через нашу точку $\bar{M}$, расположен на высоте $\bar{\Delta h}$ над этой точкой, так что этот G -уровень проходит через точку M , лежащую на Γ -сфероиде с большой полуосью $\bar{a}_G = \bar{a} + \sqrt{1 - \bar{e}^2 \cos^2 V} \bar{\Delta h}$ и на S -сфероиде с большой полуосью $\bar{a}_S = \frac{\bar{a}_G}{\sqrt{1 - \sigma_S^2}}$,

$$\text{где } \sigma_S^2 = 1 - \frac{\cos^2 V_S}{\cos^2 V}.$$

Соответственно, уже за реальную в Z -поле уровенную высоту точки $\bar{M}$ можно принять величину $\Delta a_Z = \bar{a}_S - a_0$. В нашем примере $\bar{a}_G = 6372922,45$ м; $\sigma_S^2 = 0,001732446$; $\bar{a}_S = 6378450,01$ м и $\Delta a_Z = 313,01$ м.

Таким образом, спутниковое позиционирование позволяет осуществить уровневое нивелирование и тем самым вместе с плановыми геодезическими координатами полностью удовлетворить традиционным целям геодезии. Однако данные спутникового позиционирования не исчерпывают этим свой информацион-

ный потенциал.

В гравистике показано, что в Γ -поле значение $\gamma_r(\bar{M})$ силы притяжения в точке $\bar{M}$ определяется формулой

$$\gamma_r(\bar{M}) = \frac{k}{\bar{a}^2 \sqrt{1 - \bar{e}^2 \cos^2 V}}. \quad (8)$$

В нашем примере $\gamma_r(\bar{M}) = 982168,80$ мГал.

Чтобы в той же точке $\bar{M}$ получить значение $\gamma_G(\bar{M})$ силы притяжения в G -поле, необходимо прежде найти коэффициент $t = (\bar{a}^3 \sqrt{1 - \bar{e}^2})/k$ перехода от полученной высотной аномалии Δh в точке $\bar{M}$ к аномалии в ней силы притяжения $\Delta \gamma = \Delta h/t$.

В нашем примере $t = 6,48375$ и при $\Delta h = 199,97$ м получается $\Delta \gamma = -30,84$ мГал.

Интересующее нас итоговое значение $\gamma_G(\bar{M})$ получается по формуле

$$\gamma_G(\bar{M}) = \gamma_r(\bar{M}) + \left(1 + 2 \frac{(1 - \bar{e}^2) \left(1 - \frac{\bar{e}^2 \cos^2 V}{2} \right)}{(1 - \bar{e}^2 \cos^2 V)^2} \right) \Delta \gamma.$$

В нашем примере

$$\begin{aligned} \gamma_G(\bar{M}) &= 982168,80 - 2,998361 \cdot 30,84 = \\ &= 982076,33 \text{ мГл.} \end{aligned}$$

Для большей убедительности тот же результат можно получить другим путём. Радиальной аномалии $\delta R = 199,97$ м в точке $\bar{M}$ отвечает изменение большой полуоси Γ -сфероид

$$\delta a = \sqrt{1 - \bar{e}^2 \cos^2 V} \delta R.$$

В нашем примере $\delta a = 199,81$ м. Так что точке $\bar{M}$, лежащей на Γ -сфероиде с полуосью $\bar{a}$, отвечает точка $\hat{M}$, лежащая на согласованном с ним G -уровне, через которую проходит Γ -сфероид с полуосью $\hat{a} = \bar{a} + \delta a = 6373322,07$ м.

По формуле (8) с этим значением $\hat{a}$ и с $\hat{e}^2 = (p/\hat{a})^2$ при том же значении $\cos^2 V$ получаем значение $\gamma_r(\hat{M}) = 982107,17$ мГл. И теперь для перехода к $\gamma_G(\bar{M})$ к этому значе-

нию следует прибавить полученное значение $\Delta \gamma = -30,84$ мГл. В результате снова получаем значение

$$\gamma_G(\bar{M}) = \gamma_r(\bar{M}) + \Delta \gamma = 982076,33 \text{ мГл.}$$

Далее известным путём нетрудно найти действие центробежной силы в точке и перейти в ней к силе тяжести $g_G(\bar{M})$.

Здесь нужно отметить, что определение таких сил не входит в конечную цель классической геодезии. В ней силы тяжести подлежат измерению и их значения $g_z(\bar{M})$ используются для достижения её главной — геометрической цели. В связи с этим встаёт вопрос об информативной ценности аналитически получаемых значений $g_G(\bar{M})$. Назовём их *гармоническими силами тяжести*.

На практике гармонические значения $g_G(\bar{M})$ могут значимо отличаться от измеренных значений $g_z(\bar{M})$, то есть такие отличия не могут быть объяснены только ошибками позиционирования и гравиметрических измерений. В самом деле, значения $g_G(\bar{M})$ получаются в предположении, что точки $\bar{M}$ находятся в гармоническом G -поле, т.е. в пространстве, свободном от притягивающих масс. Но фактически эти точки находятся на земной поверхности в области действия как приграничных земных масс, так и массы атмосферы. Так что, строго говоря, это уже точки негармонического поля и значения $g_z(\bar{M})$ измеряются в нём, а не в G -поле. Так что возможная значимая разность $g_z(\bar{M}) - g_G(\bar{M})$ должна нести в себе определённую геофизическую информацию, которую желательно уметь расшифровывать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Н.Д. Гравистика. М.: РИО ГУЗ. 2008.
2. Дроздов Н.Д. К доказательству центральной теоремы гравистики // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». — 2014. — №5. — С. 3–6.

Принята к печати 18 марта 2014 г.
Рекомендована кафедрой геодезии
и геоинформатики ГУЗ

УДК 528

ГЕОДЕЗИЯ

ГЕОДЕЗИЯ – ДРЕВНЕЙШАЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ НАУКА ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ЗЕМЛИ И ЕЁ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Член-корр. РАН В.П. Савиных, профессор, доктор техн. наук Х.К. Ямбаев

Московский государственный университет геодезии и картографии

vp@miigaik.ru

Аннотация. Показано исторически-эволюционное развитие предмета и содержание геодезии, как одной из основных областей знаний, её роль в решении фундаментальных задач исследования Земли путем измерения её поверхности и физических полей, решения геодинимических, координатно-временных и навигационных задач, обеспечения исследований околоземного пространства, а также необходимыми исходными данными изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений гражданского, промышленного, оборонного и любого другого назначения. Приводятся уточненная формулировка предмета, содержание области знаний и науки геодезия с учётом современного состояния науки и техники, и задач, стоящих в начале XXI в.

Ключевые слова: геодезия, наука, метрология

Abstract. A historical evolutionary development of the subject is shown alongside with the content of geodesy as one of the basic branches of study, its role in solving fundamental tasks in the Earth exploration by measuring the surface and physical fields, and dealing with geodynamic, coordinate-time and navigational tasks, providing research in near-earth space as well as essential raw data for exploration, engineering, constructing, and maintaining various constructions of civil, industrial, military and other profiles. The subject articulation and contents of the scientific study are refined with respect to modern state of the science and engineering, and to the tasks stated in the beginning of the 21st century.

Keywords: geodesy, science, metrology

В классификаторе Российского научного фонда (РНФ) «Поддержка и развитие», опубликованного в конце 2013 г., среди десятков областей знаний и многих сотен предлагаемых конкурсных тем, к сожалению, не нашлось места геодезии, ни как одному из фундаментальных научных исследований, ни как возможным темам прикладного характера — т.е. ни «поддержка», ни «развитие» не предусмотрены для старейшей на Земле науки и целой области знаний.

Хотя и с большим опозданием, обращаем Ваше внимание на статью уважаемого профессора А.К. Певнева — выпускника МИИГАиК 1954 г. — под интригующим названием «Наука ли геодезия?». А.К. Певнев высоко оценивает роль и место геодезии, но причисляет её к таким более поздним наукам, как геофизика, сейсмология и т.п. [1], о которых ещё речи не было при формировании Древней геодезии,

геодезии в Средние века и расцвете геодезии XIX–XX вв. Несмотря на то что геодезия во многом дала толчок развитию и этих, и других наук о Земле, в РАН до сих пор не представлена эта важнейшая область знаний.

На сегодняшний день формулировку предмета геодезии в кратком виде следует признать следующей.

Геодезия — это наука об исследовании Земли путём измерения её поверхности и физических полей с целью создания топографических планов и карт, уточнения формы и параметров Земли, решения координатно-временных и навигационных задач, создания исходной основы для изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений гражданского, промышленного, оборонного и любого другого назначения, кадастров земель и недвижимости. Результаты геодезических измерений являются костяком — основой

инфраструктуры пространственных данных и ГИС-систем.

Картографо-геодезическая отрасль была зарождена ещё по настоянию Петра I и затем возрождена в 1919 г. по инициативе академика В.И. Вернадского. С давних времен отрасль была государственной при правительстве России, занималась фундаментальными геодезическими, гравиметрическими, картографическими работами, обеспечивая развитие многочисленных отраслей экономики страны государственными топографическими картами всех масштабов и атласами, которые постоянно обновлялись по материалам аэрокосмических съемок.

К сожалению, в настоящее время государственный надзор за картографо-геодезической отраслью и развитием геодезической науки значительно ослаб, поэтому наблюдаются серьезные отставания в фундаментальных и прикладных НИР по геодинамическому мониторингу движений земной коры и деформаций ответственных инженерных объектов, проводимому с целью уменьшения риска и последствий опасных явлений природного и техногенного характера, а также в создании отечественных компьютеризированных оптико-электронных средств и систем измерений, спутниковых технологий и приемников ГНСС, особенно сейчас, в период завершающего этапа формирования системы ГЛОНАСС.

Требуются новые технологии обновления топографических карт, усовершенствование и развитие навигационных карт и систем для воздушного, морского, наземного транспорта и т.п. Всё это и побудило авторов ещё раз привлечь внимание научной общественности к рассмотрению современного представления предмета, цели и задач древнейшей науки — Геодезия, непременно востребованной человечеством в каждом хронологическом разрезе истории развития цивилизации, и к обоснованию важности и значимости данной области знаний.

Геодезия — интегрированная система ряда таких научных дисциплин (подсистем), как топография, маркшейдерия, гравиметрия, фотограмметрия, картография, геодинамика, астрономогеодезия, аэрофотогеодезия, прикладная геодезия, космическая геодезия и является их основой.

Уже из этого неполного перечня геодезических дисциплин видно, какие разнообразные задачи — и теоретического, и практического характера — приходится решать геодезистам, чтобы удовлетворить требования государственных и коммерческих учреждений, компаний и фирм. Для государственного планирования и развития производительных сил страны необходимо изучать ее территорию в топографическом отношении. Топографические карты и планы, создаваемые геодезистами, нужны всем, кто работает на Земле: геологам, морякам, летчикам, проектировщикам, строителям, земледельцам, лесоводам, туристам, школьникам и т.д. Особенно нужны карты армии: строительство оборонительных сооружений, стрельба по невидимым целям, использование ракетной техники, планирование военных операций — все это без карт и других геодезических материалов просто невозможно.

Представим себе некоторую систему знаний S и, что какое-то число систем типа S соединены в единое целое и управляются одной логикой. Образованную таким образом интегрированную систему S^+ можно назвать мегасистемой, т.е. система S^+ — геодезия, содержит ряд подсистем — научных дисциплин: гравиметрия, топография, фотограмметрия, картография, отдельные подсистемы средств геодезических измерений, геоинформатика и ГИС разного назначения.

В целом (в итоге) такая система S^+ имеет свою четко организованную кибернетическую структуру, позволяющую оптимально управлять содержанием, развитием составных подсистем, интегрировать новые подсистемы. Таким образом, мы можем наблюдать за деятельностью этих подсистем, за их функционированием.

Измерения в изучении окружающего нас геопространства имеют решающее значение. Методы и средства измерений, их точность, надежность и производительность соответствуют исторической эпохе и общему научно-техническому уровню развития вообще и в данной области знаний геодезии, в частности. По Д.И. Менделееву: «В природе мера и вес являются главными орудиями познания! Наука начинается тогда, когда начинают измерять».

Профессор А.А. Изотов писал: «Изучение истории геодезии дает возможность во всей

полноте оценить её вклад в человеческие знания, определить её значение и место среди фундаментальных и прикладных наук. Очень немногие из современных наук обладают такой древней историей как геодезия. Не относясь изначально к фундаментальным наукам, геодезия дала жизнь некоторым из них и этот феномен даже у историков не нашёл еще должного, достаточно разумного и приемлемого объяснения».

Поскольку цивилизация существует в мире категорией пространства времени и движения, геодезия первоначально изучала окружающее геопространство путем соответствующих измерений в отрыве от времени и движения, используя лишь двухосные системы ориентации и отсчёта.

Философская сущность геодезии состоит в том, что от мировоззрения того или иного периода истории прямо зависит интерпретация элементов окружающего геопространства: почти художественная картина; строгий графический план (чертеж); трехмерная топографическая карта; цифровая (дигитальная) карта; бесконечно большое облако трехмерных координат (3D-скан).. —.... и... что-то ?!... будет на следующем этапе развития цивилизации в соответствии с потребностями того или иного этапа развития человеческого бытия.

Именованье начинается от первого определения науки (Аристотель 384–322 г. до н.э.) геодезия — «землеразделение», практическая геометрия (средние века), наука об определении фигуры Земли (середина XIX–начало XX вв.), до современного (конец XX–начало XXI вв.), наука, применяющая специализированные методы определения и контроля окружающего пространства и его элементов, отображения метрической структуры пространства в цифровые и геометрические модели, а также в изыскания методов перенесения метрики проектных структур в натуру. Такие определения довольно тяжеловесны и непонятны.

Именованье начинается от первого определения науки (Аристотель 384–322 г. до н.э.) геодезия — «землеразделение», практическая геометрия (средние века), наука об определении фигуры Земли (середина XIX–начало XX вв.), до современного (конец XX–начало XXI вв.), наука, применяющая специализированные методы определения и контроля окружающего пространства и его элементов, отображения метрической структуры пространства в цифровые и геометрические модели, а также в изыскания методов перенесения метрики проектных структур в натуру. Такие определения довольно тяжеловесны и непонятны.

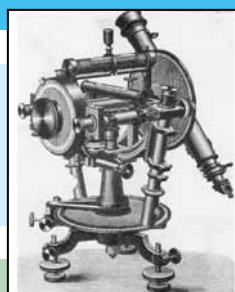
Наука об исследовании Земли и её физических полей

середина XX — начало XXI века



Наука об определении фигуры Земли

XIX — начало XX века



«Практическая геометрия»

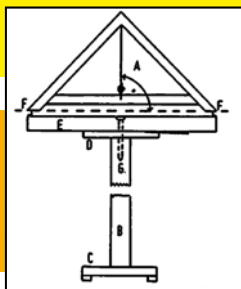


Средние века.

*Улугбек 1394 – 1449 гг.
Леонардо да Винчи 1452 – 1519 гг.*

Землеразделение («geo» – земля, «daizo» – разделяю).

Аристотель 384-322 г. до н. э.



Научный трактат «О Диоптре»

Герон Александрийский 175 г. до н. э.

В настоящее время результаты геодезических измерений являются основой (масштабом) формирования и функционирования инфраструктуры геопространственных данных в их трехмерном 3D-представлении.

Известно что, «геодезия» — слово греческого происхождения, образовано из двух слов «ge» — «гео» — «земля» и «daizo» — «дайзо» — «разделяю», что в переводе означает «землеразделение». Такое буквальное определение геодезии говорит только лишь о том, что она является одной из древнейших наук о Земле. В процессе исторического развития содержание каждой науки непрерывно меняется, в связи с чем неизбежен разрыв между названием науки и её содержанием. Так, например, «геометрия» буквально определяется как «землеизмерение». Однако в наше время измерения на Земле не являются предметом геометрии, этой проблемой занимается геодезия — наука об измерениях на земной поверхности и в околоземном пространстве, а также о необходимой математической обработке полученных результатов (вычислениях) и графических построениях, проводимых при интерпретации элементов геопространства в том или ином виде для решения конкретной задачи.

При измерении различных величин невозможно получить их истинное значение. В связи с этим возникает необходимость определения их вероятнейшего значения по результатам измерений, т.е. наиболее близкого к истинному. С этой целью в геодезии применяется математическая обработка результатов измерений, в которой используются методы высшей математики, вычислительной техники, математической статистики, теории вероятностей, теории ошибок и теории информации.

Проектирование, строительство и эксплуатация инженерных сооружений, планировка, озеленение и благоустройство населенных мест, изучение и добыча полезных ископаемых, сельскохозяйственное и лесное производство, обеспечение обороноспособности государств — во всех этих и многих других сферах жизнедеятельности человека приходится решать задачи на основе геодезических измерений на поверхности Земли. Решение таких инженерных задач основывается на измерении различных физических величин, что является неотъ-

емлемой частью геодезии, и поэтому как наука геодезия близка к метрологии.

Геодезия — наука об измерениях Земли и её физических полей — составляет метрическую основу формирования и функционирования инфраструктуры пространственных данных геоинформатики и ГИС-систем, их единства.

Метрология — глубоко формализованная наука об измерениях физических величин, методах и средствах обеспечения требуемой точности.

И в геодезии, и в метрологии используются много общих принципов, главный из которых связан с необходимостью обеспечения единства измерений. При этом под единством измерений понимается такое состояние измерений, при котором их результаты выражаются в узаконенных единицах, а погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Одна из главных задач измерений в процессе производства геодезических работ состоит не только в получении результата измерения, но и в оценке его достоверности. Этой задаче подчинена технология геодезических работ, обязательным условием построения которой является наличие избыточных измерений, обеспечивающих не только контроль работ, но и возможность количественной оценки их качества и надежности. Поэтому ту часть геодезии, которая занимается рассмотрением комплекса научных, организационных, технических, нормативных и методических вопросов, необходимых для обеспечения требуемой точности измерений, логично обозначить понятием «геодезическая метрология». Важнейшими составными элементами этого понятия являются: геодезические измерения, метод геодезических измерений, средство геодезических измерений, погрешность геодезических измерений, точность геодезических измерений («неопределенность результатов измерений»).

Термин геодезическая метрология никоим образом не подменяет обобщенное понятие геодезические измерения, которое определяется как совокупность измерений, проводимых для получения количественной информации о взаимном положении объектов материального мира в процессе выполнения топографо-геодезических работ. По аналогии с общепринятой терминологией, отметим далее, что под методом геодезических измерений понимается

совокупность приемов использования технологических принципов и технических средств измерений. В свою очередь, средство геодезических измерений — это техническое средство (инструмент, прибор, мера, установка, система), предназначенное для выполнения измерений в геодезическом пространстве.

Следует указать, что в качестве геодезических величин выступают физические величины, значения которых определяют в результате производства геодезических измерений, а именно: длина линии (стороны), горизонтальный угол, вертикальный угол (зенитное расстояние), угол наклона, азимут, превышение, высота (отметка), координаты (приращения координат) пункта. При этом под результатом геодезических измерений понимается совокупность данных измерений, полученных после их завершения, последующей математической обработки и оформления в виде конечной или промежуточной продукции (информации).

Единообразие средств геодезических измерений заключается в том, чтобы их метрологические параметры (характеристики) соответствовали установленным нормам, регламентированным в нормативных документах. Это состояние обеспечивается через процедуры метрологического контроля.

Таким образом, можно заключить, что содержание понятия «геодезическая метрология» базируется на системе взаимоувязанных требований, суть которых проистекает из необходимости обеспечения точности и достоверности результатов геодезических измерений.

Последние два десятилетия характеризуются стремительным использованием в конструкциях геодезических средств измерений (СИ) цифровых информационно-измерительных систем, средств фотоэлектрии, микропроцессов и т.п. Это открыло широкие возможности созданию и бурному внедрению высокопроизводительных, с высоким уровнем автоматизации и роботизации, геодезических инструментов и систем. В связи с этим революционно изменяется технология производства геодезических работ при решении разнообразных технических задач для изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Если в 1989 г. известный конструктор геодезических средств измерений А.И. Захаров

писал об «агрегате, состоящем из теодолита и светодальномерной насадки..., электронным тахеометрам еще только предстоит найти своё место в технической цепи топографо-геодезических работ», то в 2013 г. без электронных тахеометров трудно представить любые виды геодезических измерений при изысканиях, проектировании и строительстве инженерно-технических сооружений, в кадастрах земель и недвижимости, при геодинимических наблюдениях за деформациями и осадками геотехнических систем. В настоящее время уже широко внедряются сверхбыстродействующие лазерные сканеры и лазерные трекеры, являющиеся результатом коренной модернизации роботизированных электронных тахеометров. В свою очередь, даже эти высокоточные инструменты и системы уже сами усвершенствуются и модернизируются в новые, более совершенные геодезические СИ.

Исходя из вышеприведенной объективной формулировки данной области знаний представляется необходимым введение в «Классификатор РФ» раздела: «Геодезия и картографические науки», по крайней мере, со следующими направлениями НИР.

1. Формирование структуры геопространственных данных.
2. Уточнение формы и параметров Земли.
3. Гравитационное поле Земли и её моделирование.
4. Системы координат и их взаимосвязь.
5. Геодезический мониторинг движений земной коры и предвестники землетрясений.
6. Геодинимические системы сейсмоопасных регионов.
7. Развитие спутниковых и навигационных систем.
8. Автоматизация крупномасштабных топографических съемок.
9. Обновление топографических карт и планов.
10. Развитие референчных спутников их геодезических сетей регионов.
11. Спутниковое нивелирование и координатное позиционирование.

Результаты этих и других актуальных направлений НИР и ОКР окажут положительное влияние на развитие экономики Российской Федерации.

Современное содержание науки ГЕОДЕЗИЯ наиболее полно отражено в паспорте научной специальности, утвержденном ВАК РФ.

ВАК РФ 25.00.32 Геодезия

Основное описание. Содержанием специальности является уточнение формы и размеров Земли, ее гравитационного поля, пространственных характеристик природных и техногенных объектов, явлений и процессов на ее поверхности, создание геоинформационного пространства как базового продукта геодезического обеспечения территорий, а также установление закономерностей их пространственно-временных изменений.

Области исследований

1. Уточнение параметров земного эллипсоида, геоида и гравитационного поля Земли, изменение их в пространстве и во времени.

2. Создание геодезической координатно-временной основы различного назначения с использованием геодезических, астрономических, гравиметрических и других (космических, наземных и подземных) методов измерений; оценка их степени устойчивости и характера изменений, вопросы их проектирования и оптимизации. Геодезические системы координат.

3. Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы и технологии. Формирование активного координатно-временного пространства на основе навигационной инфраструктуры ГЛОНАСС и др. Геодезические системы наземного, морского и космического базирования для определения местоположения и навигации подвижных объектов геопространства, в том числе транспорта, военной техники, людей и животных.

4. Разработка новых принципов, методов, технических средств и технологий геодезических измерений для определения геометрических и физических параметров Земли, ее поверхности, объектов, явлений и процессов на ней, в том числе для производства наземных топографических съемок.

5. Методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения строительно-монтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-изыскательских, маркшейдерских, геолого-разведочных и лесоустроительных работ; освоения шельфа; мон-

тажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования.

6. Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов.

7. Геодезическое обеспечение геодезического мониторинга состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению кризисных ситуаций.

8. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, зданий и сооружений, вызванного природными и техногенными факторами, с целью контроля их устойчивости, снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, в том числе землетрясений.

9. Геодезическое информационное обеспечение устойчивого развития территорий на основе ГИС-технологий. Принципы формирования, состав и структура геоинформационного пространства, отображающего совокупность пространственных характеристик территорий.

10. Разработка принципов и технологий создания геоинформационных систем различного назначения по геодезическим данным.

11. Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным.

12. Современные системы накопления, обработки, хранения, передачи и использования геодезической информации, в том числе форматы геоданных, инфраструктуры и территориальные банки геопространственных данных, электронные геопространства, базы геодезических знаний, геосервисы, геослужбы, геоportалы и другие геодезические системы в Интернет.

13. Геодезическая метрология. Разработка методов, средств и нормативных докумен-

тов для метрологического обеспечения геодезических средств измерений. Создание и функционирование эталонных геодезических полигонов, базисов и компараторов для поверки, калибровки и аттестации геодезических средств измерений.

14. Проектирование и маркетинг геодезических работ. Разработка методов и технологий реализации надзорной функции государства за геодезической деятельностью. Разработка методов и средств автоматизации и информати-

зации деятельности органов Государственного геодезического надзора. Геодезическое обеспечение создания и ведения российской инфраструктуры пространственных данных с целью обеспечения программ: «Электронная Россия», «Электронное правительство», «Электронный документооборот» и др.

15. Разработка научно-методических основ и принципов геодезического образования.

Принята к печати 18 марта 2014 г.

НОВЫЕ СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕФЕРЕНТНЫХ ПРЯМЫХ

Профессор, доктор техн. наук **Г.А. Шеховцов**, доцент **Р.П. Шеховцова**
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
nir@nngasu.ru

Аннотация. Приведены примеры формирования вертикальных референтных прямых с целью применения фотографического способа геодезического контроля пространственного положения инженерных объектов. Показана методика использования цифровых фотоаппаратов, совместимых с персональным компьютером, программ редактирования фотографических изображений и масштабирования снимков. Даны рекомендации.

Ключевые слова: геодезический контроль, референтная прямая, фотографический способ, масштабирование снимка

Abstract. Examples of forming vertical reference lines for the application of the photographic method of the geodetic control of the spatial position of engineering objects are adduced. The technique of using digital cameras compatible with personal computer, software for editing photographic images are demonstrated. Some recommendations attached.

Keywords: geodetic control, reference line, photographic method, snapshot scaling

Контроль пространственного положения строительных конструкций инженерных сооружений (проверка их вертикальности, горизонтальности, прямолинейности и т.п.) предусматривает выполнение различного вида геодезических измерений с последующим сравнением полученных результатов с их истинными значениями, в качестве которых зачастую выступают так называемые референтные прямые линии.

Референтной прямой принято называть линию, которая с достаточной степенью точности совмещена (или ориентирована с известными параметрами переноса) с осями выверяемого объекта. Формирование реальных референтных прямых может осуществляться способом струнного створа, оптического створа, лучевого створа. Референтная прямая может быть не только реальной, но и воображаемой. Так,

например, определение крена дымовой трубы способом направлений предусматривает определение отклонения оси трубы от воображаемой вертикальной линии. Такой же воображаемой может быть горизонтальная линия при нивелировании, например, подкрановых путей мостового крана с целью проверки их горизонтальности.

В работах [1, 2] показаны примеры формирования горизонтальных референтных линий оптическим и лучевым способом с целью геодезического контроля прямолинейности и соосности строительных конструкций. Наличие цифровых фотоаппаратов, совместимых с персональным компьютером и программ редактирования фотографических изображений, ArchiCAD 11 и др. позволяет рекомендовать различные варианты нового фотографического способа геодезического контроля вертикаль-

ности высоких инженерных сооружений. Для этого достаточно сфотографировать это сооружение и вывести его изображение на экран монитора ПК. При этом необходимо решить две задачи. Во-первых, на снимке должна присутствовать вертикальная референтная линия, от которой будут производиться все необходимые измерения. И, во-вторых, снимок должен быть масштабирован для получения результатов измерений в метрической системе единиц (метры, сантиметры или миллиметры).

В общем виде вертикальную референтную линию можно получить следующим образом. Покажем это на примере дымовой трубы (рис. 1). Устанавливают теодолит в точке I (см. рис. 1, *а*) и производят вертикальное проектирование хорошо заметной верхней точки M на горизонтальную нивелирную рейку, закрепленную внизу трубы (см. рис. 1, *б*). Фиксируют на рейке отсчёт M' . Затем сооружение фотографируют так, чтобы на фотографии были четко видны точка M и рейка.

Эту фотографию выводят на экран монитора и на ней проводят линию, соединяющую

точки M и M' (см. рис. 1, *б*). В дальнейшем все измерения можно производить от этой линии или от произвольной линии AB , ей параллельной. Измерения заключаются в определении расстояний от референтной линии AB до левого и правого края образующей трубы в верхнем l'_b, l'_b , нижнем l'_n, l'_n и любых других промежуточных сечений трубы $1, 2, 3 \dots$. Нивелирная рейка, помимо прочего, служит для масштабирования снимка. Сами измерения l_i можно производить с помощью обычной линейки с миллиметровыми делениями, с помощью горизонтальной линейки на экране монитора или, при наличии программы редактирования фотографических изображений, с помощью стрелки-курсора.

Для каждого сечения вычисляют расстояние от референтной линии до центра трубы $l_{\text{ц}}$ по формуле

$$l_{\text{ц}} = l_i + 0,5(l'_i - l_i). \quad (1)$$

Сравнивая полученные расстояния между собой, можно судить о крене трубы и об отклонениях её оси от вертикали по направлению,

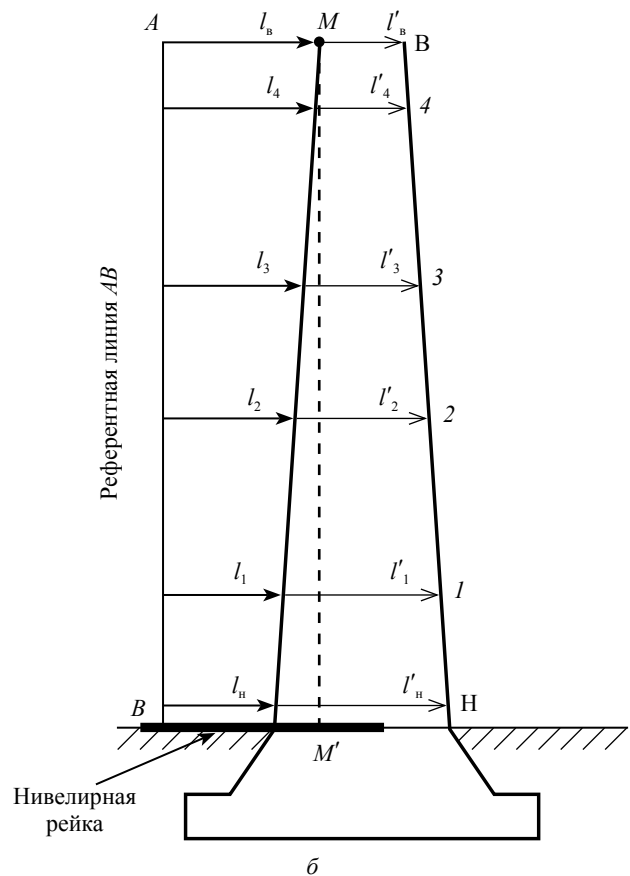
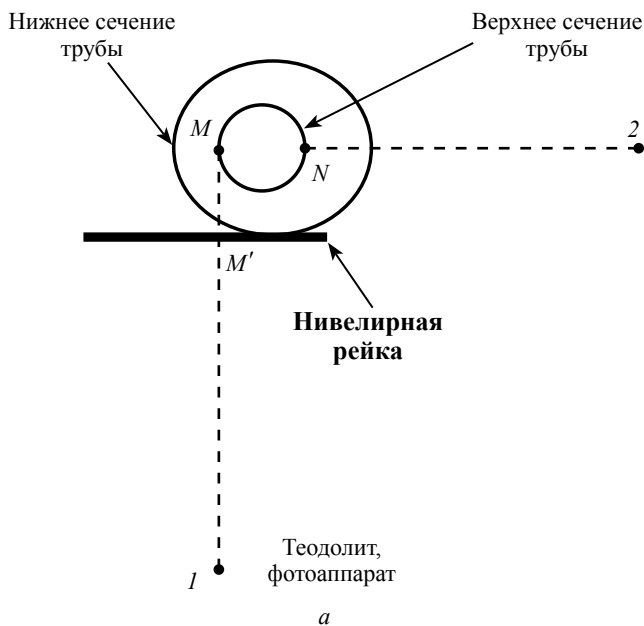


Рис. 1. Принцип формирования вертикальной референтной линии

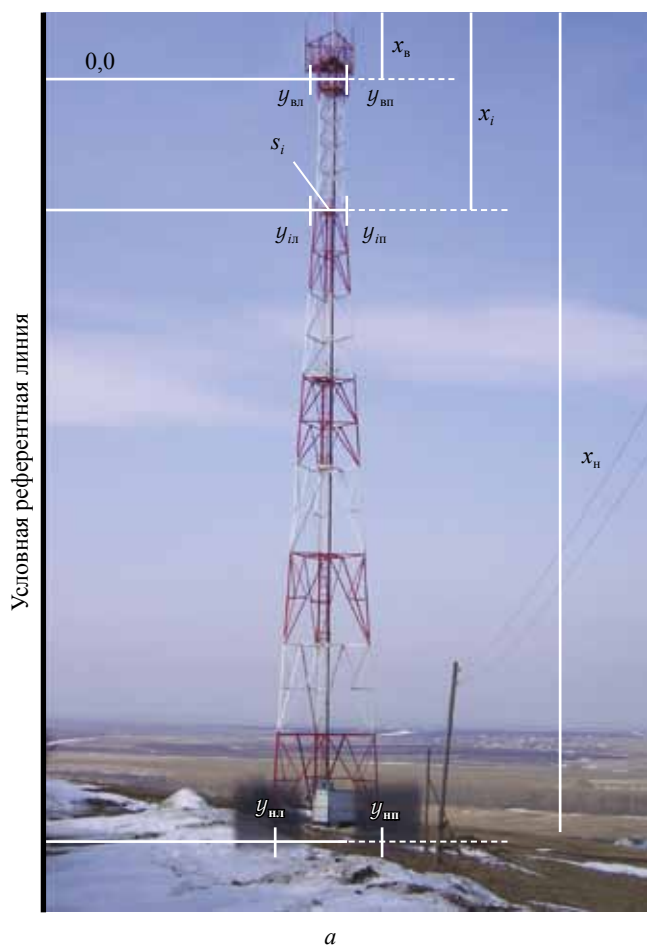
перпендикулярному направлению фотографирования. Для получения полного крена трубы и его направления надо все действия повторить с точки 2.

Для определения крена сооружения башенного типа треугольной формы можно использовать описанный выше фотографический способ в сочетании с вертикальным проектированием. Устанавливают теодолит на некотором расстоянии от башни и производят вертикальное проектирование наклонным визирным лучом теодолита при двух положениях вертикального круга хорошо заметной верхней точки M_B сооружения на горизонтальную нивелирную рейку, закрепленную внизу сооружения. Фиксируют на рейке отсчёт M_H (рис. 2). Затем сооружение фотографируют так, чтобы на фотографии были четко видны точка M_B и рейка, которая в дальнейшем служит для масштабирования снимка. Эту фотографию выводят на экран монитора, где воображаемая линия $M_B M_H$ будет являться

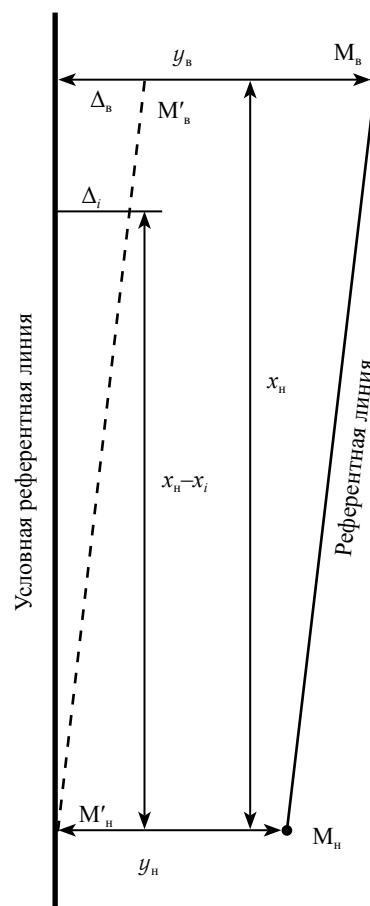
референтной.

Программа редактирования фотографических изображений предусматривает наличие прямоугольной системы координат, начало которой (0,0) может совпадать, например, с левой верхней точкой снимка. Осью x является левый край снимка, а осью y — его верхний край. Подводя последовательно стрелку-курсор к точкам M_B и M_H , сразу читают на экране монитора значения расстояний y_B и y_H в некоторых условных единицах. Если эти расстояния одинаковы, то ось x (условная референтная линия) параллельна $M_B M_H$.

В дальнейшем все измерения производят от осей x и y . Измерения заключаются в определении расстояний от условной референтной линии до левого и правого края башни в верхнем $y_{ВЛ}$, $y_{ВП}$, нижнем $y_{НЛ}$, $y_{НП}$ и любых других $y_{iЛ}$, $y_{iП}$ промежуточных сечений трубы. Одновременно с этим фиксируют вертикальные расстояния $x_B, \dots, x_i, \dots, x_H$. Результаты измерения фотографии башни (см. рис. 2, б) по 11 её сечениям, расположенным на разной вы-



а



б

Рис. 2. Схема формирования и использования референтной линии

соте, представлены в таблице.

Результаты измерения фотографии башни

Сечение	Отметка, м	S_p , мм	y_l	y_n	x	$y_n - y_l$	y_0	Цена деления l , мм
1	0	10500	289	424	925	135	356,5	77,78
2	8	9433	296	417	820	121	356,5	77,96
3	16	8367	304	411	718	107	357,5	78,20
4	24	7300	312	404	615	92	358,0	79,35
5	32	6233	320	398	514	78	359,0	79,91
6	40	5167	328	392	414	64	360,0	80,73
7	48	4100	336	386	318	51	360,5	80,39
8	56	3033	343	381	222	38	362,0	79,82
9	60	2500	347	378	178	31	362,5	80,64
10	65	2500	348	379	116	31	363,5	80,64
11	72,5	2500	347	379	68	31	363,5	80,64

Для каждого сечения были подсчитаны разности $(y_n - y_l)$ и найдены расстояния y_0 от условной референтной линии до оси сооружения по формуле

$$y_0 = y_l + \frac{y_n - y_l}{2}. \quad (2)$$

Сравнивая полученные значения y_0 между собой, судят об отклонениях оси башни от вертикали на разных уровнях. В нашем примере общий крен башни составляет $363,5$ (сечение 11)– $356,5$ (сечение 1)= 7 условных единиц, умножив которые на цену одной условной единицы (цену деления), можно выразить его в миллиметрах.

Цену деления l можно определить, поделив известную длину отрезка в миллиметрах на её длину в условных единицах. В нашем примере отрезками известной длины были проектные длины сторон S_i треугольников разных сечений, поэтому l определялась по формуле

$$l = \frac{S}{y_n - y_l}. \quad (3)$$

Результаты определения l , представленные в таблице, находятся в пределах $77,78$ – $80,64$ мм, то есть отличаются всего на $2,86$ мм. Среднее значение цены деления составило $79,64$ мм, поэтому общий крен башни в нашем примере будет равен $7 \times 79,64 = 557,48$ мм.

Рассмотренный выше пример предусматривал параллельность референтной линии $M_B M_H$ левому краю фотографии (оси x). Если на фотографии (см. рис. 2, б) y_B не равно y_H , отличаясь на $\Delta_B = y_B - y_H$, то в результаты измерений $y_{ил}$, $y_{ип}$ необходимо вводить поправки Δ_i со знаком, противоположным знаку Δ_B , вычисляя

их по формуле

$$\Delta_i = \Delta_B \frac{x_H - x_i}{x_H}. \quad (4)$$

Таким образом, рассмотренный пример использования фотоснимка и программы редактирования фотографических изображений доказывает возможность применения фотографического способа контроля вертикальности сооружений башенного типа. В настоящее время современная фотоаппаратура позволяет выполнять фотоснимки с разрешением 30 мегапикселей и более. Поэтому, значительно повысить точность получаемых результатов можно путём использования фотоснимков высокого разрешения.

В ряде случаев в качестве вертикальной референтной линии может служить нить свободно подвешенного шнурового отвеса. Так (рис. 3), если рядом с колонной подвесить отвес, сфотографировать колонну вместе с нитью этого отвеса, то измерив расстояния от нити до левого и правого края колонны сверху $y_{вл}$, $y_{вп}$ и внизу $y_{нл}$, $y_{нп}$, можно вычислить расстояния от отвеса до оси колонны сверху y_B и внизу y_H по формуле (2), которую после некоторых преобразований можно представить в другом виде:

$$y_B = \frac{y_{вл} + y_{вп}}{2}, \quad y_H = \frac{y_{нл} + y_{нп}}{2}. \quad (5)$$

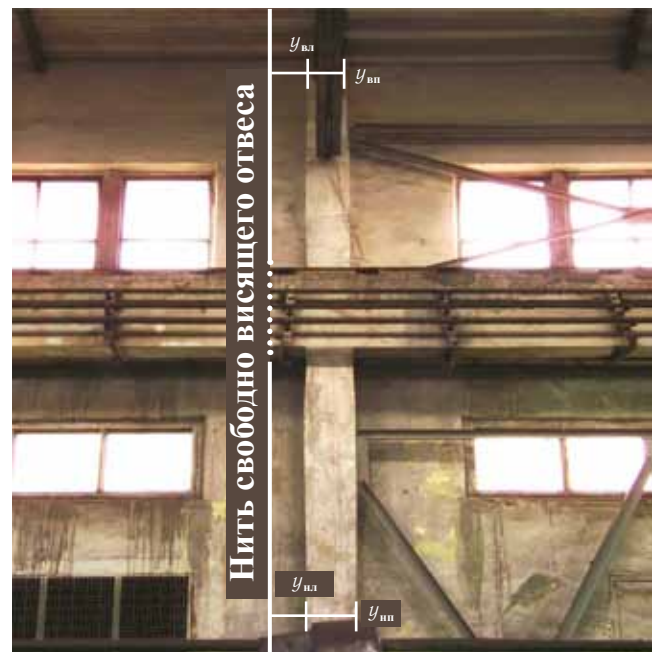


Рис. 3. Фрагмент одного из корпусов ОАО НАЗ «Сокол»

Если вычисленные по формулам (5) расстояния y_B и y_H равны между собой, то колонна в своём ряду расположена вертикально. В

противном случае по разности этих расстояний судят о величине крена этой колонны. Масштабировать снимок можно с использова-

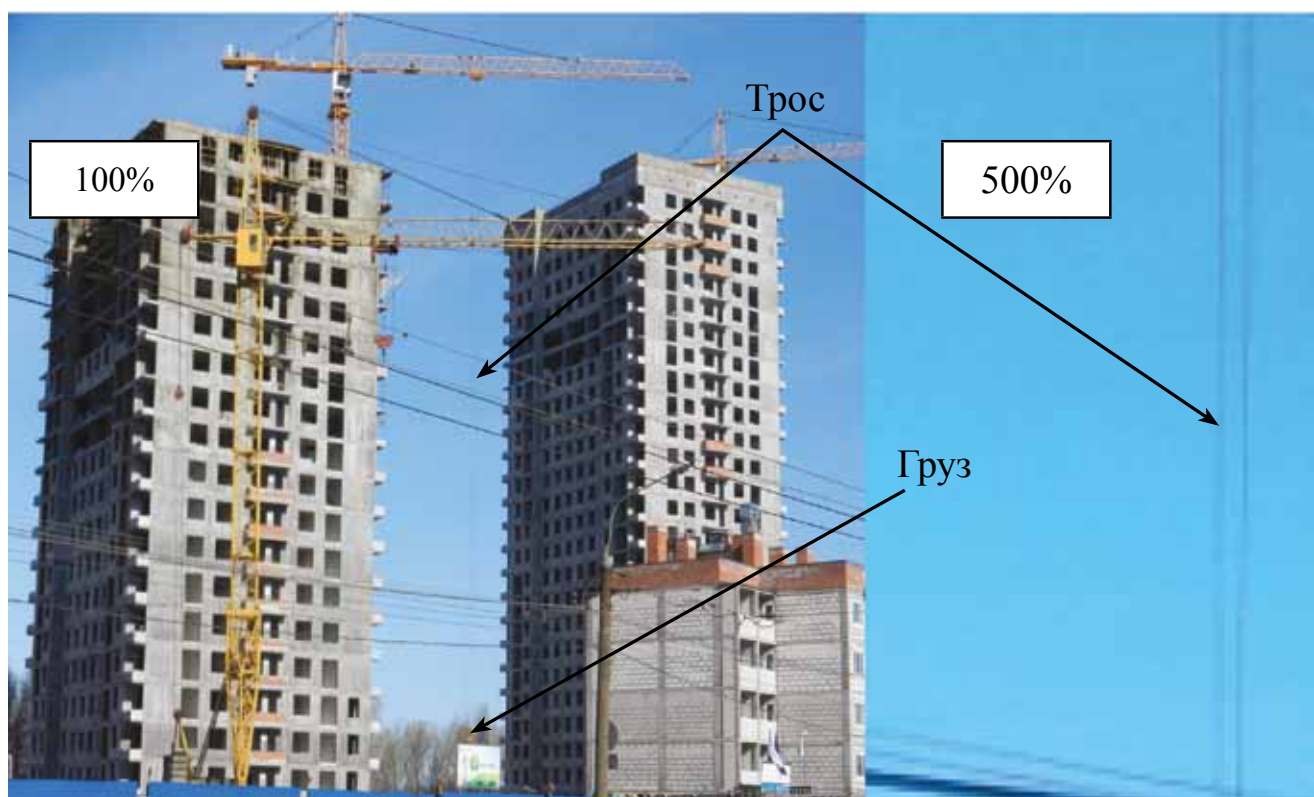


Рис. 4. Фотографии высоток и троса лебёдки подъёмного крана



Рис. 5. Фотографии телебашни и шнурового отвеса

нием формулы (3), где в качестве S будет фигурировать ширина колонны.

При строительстве в качестве вертикальной референтной прямой может служить трос лебёдки строительного крана с грузом на конце, который с увеличением масштаба четко различим на снимке (рис. 4). В качестве вертикальной референтной прямой может служить нить шнурового отвеса, расположенного перед объективом фотоаппарата. Так, на рис. 5 приведены две фотографии телебашни и нити отвеса. Одна фотография выполнена при нормальном расположении сооружения (см. рис. 5, а), другая (см. рис. 5, б) — специально выполнена при наклонном расположении башни.

Измеренные расстояния от отвеса до оси башни в обоих случаях оказались равными l_B по верху и l_H по низу. Их разность $l_B - l_H$ характеризует крен башни влево или вправо.

Наконец, определённый интерес представляет прибор Plumb-bob (<http://www.assysto.com/>). В процессе фотографирования прибор всегда даёт изображение вертикальной линии независимо от его наклона влево или вправо (рис. 6). Эту линию можно использовать в качестве вертикальной референтной прямой, от которой производить измерения.

Проведенные исследования показывают, что формируемая референтная прямая должна

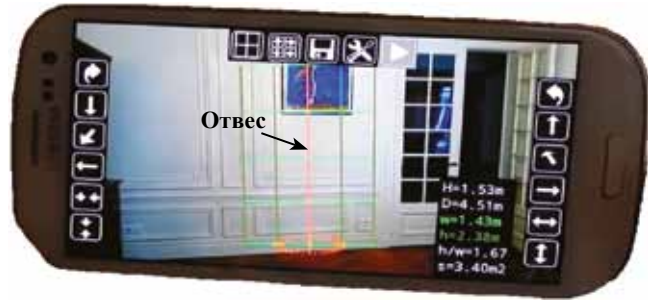


Рис. 6. Прибор Plumb-bob

располагаться по оси контролируемого элемента сооружения или находиться в непосредственной близости от неё и как можно дальше от объектива фотокамеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пимшин Ю.И., Ямбаев Х.К. О принципах формирования и средствах реализации референтных прямых // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». — 1994. — № 6. — С. 3–10.
2. Шеховцов Г.А., Шеховцова Р.П., Евсеев Д.А. Об использовании референтной прямой при геодезическом контроле соосности колонн зданий и сооружений промышленного предприятия // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». — 2006. — №3. — С.9–13.

Принята к печати 15 апреля 2014 г.
Рекомендована кафедрой
инженерной геодезии ННГАСУ

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аспирант О.В.Кроличенко

Московский государственный университет по землеустройству
olesyakrol@mail.ru

Аннотация. Производится расчет устойчивости инженерного сооружения и на основании этого расчета делается прогноз поведения инженерного сооружения, что позволяет предотвратить неправильный выбор площадки под строительство инженерного сооружения. Говорится об актуальности и важности вопроса устойчивости инженерных сооружений и методах его решений. Дается комплексный подход изысканий на строящиеся инженерные сооружения с применением геологических, геодезических и геодинамических методов.

Ключевые слова: прогноз проведения инженерного сооружения, устойчивость инженерного сооружения

Abstract. Steadiness of an engineering structure is calculated. Based on this calculation, changes in the construction are prognosed – which allows to prevent wrong choice of a place for building of the structure. A comprehensive approach to surveying of engineering structures being constructed is given for geologic, geodetic, and geodynamic methods.

Keywords: prediction of changes in a construction, steadiness of an engineering structure

Актуальность устойчивости фундаментов и конструкций инженерных сооружений велика. Строительство новых сооружений проектируется везде на устойчивых горных породах и однородных грунтовых массах вне зон сейсмического влияния. Но ранее построенные сооружения часто находятся в зонах карстовых пустот, насыпных земляных площадках, часто в черте городских поселений. Засыпка и выравнивание площадок под строительство производилось грунтами разного состава с примесью строительных и технологических отходов производства.

В дальнейшем по таким площадкам разбивалось свайное поле, которое должно обеспечивать устойчивость конструкции инженерного сооружения. Свайные поля заполняются сваями, вошедшими в грунт, не по проекту срезаются, но остаются ослабленные грунты и в конечном счете площади фундаментальной плиты в ослабленном состоянии. В этих ослабленных площадках образуются неустойчивые зоны, в которых и происходят деформации плит фундаментов и конструкций инженерных сооружений.

При сдаче сооружений в эксплуатацию должна прилагаться схема свайного поля. На практике 40% сооружений такой документации не имеют. В дальнейшем организации не заказывают эксплуатационные геофизические исследования по этому поводу.

Расчет устойчивости основания проводим по аналогии [1]

$$H_p = H - \sigma(\arg \Phi(p)), \quad (1)$$

где H_p — расчетное значение надежности для заданного уровня вероятности p ; H — точечное значение надежности 50% обеспеченности; $\arg \Phi(p)$ — функция, обратная функции Лапласа; σ — среднеквадратическое отклонение функции Лапласа.

Сопоставляя деформации инженерных сооружений как многофакторные, берем формулу [2]:

$$H = 1 - F(x), \quad (2)$$

где H — надежность при взаимодействии внешней среды и сооружения; $F(x)$ — функция распределения случайных величин x .

Принимая во внимание, что конструкция инженерного сооружения установлена соглас-

но СНиП [3] к инженерным сооружениям данного типа, мы убираем условно данный фактор, тогда уравнение (2) будет выглядеть:

$$H = 1 - kF(x), \quad (3)$$

где k — факторы влияния на надежность сооружений из-за неоднородности грунта под фундаментом сооружения и процентом брака в свайном поле под фундаментом сооружения.

В таком случае, беря во внимание представительные статистические данные по результатам наблюдений за инженерными сооружениями, приходим к выводу, что процент бракованных свай к общему свайному полю выражается следующим уравнением: $k = C_{бр}/C_n$, где $C_{бр}$ — количество бракованных свай; C_n — все сваи.

Таким образом, уравнение (2) заменим следующим: $H = 1 - (C_{бр}/C_n)F(x)$.

На предварительном этапе строительства испытание грунта рекомендуется вести методом наклономерных наблюдений [2] и использовать зависимость (3), модифицируя ее для грунтов неестественного залегания и параллельно измерив длины свай с помощью геофизических методов. Восстанавливая полностью карту свайного поля, в дальнейшем производим прогноз устойчивости и надежности грунтового основания под строящимся или реконструированным инженерным сооружением.

Прогноз поведения строящегося инженерного сооружения, т.е. его осадка, даст возможность предотвратить ошибки выбора площадки под строительство. С помощью наклономерных смещений получили натурные осадки наиболее часто встречающихся грунтов: глина, суглинок, песок [2].

На рис. 1. показана схема расположения прибора и штампа. Штамп заглублялся на глубину 40 см, весом 100, 300 и 500 кг. Расстояние от прибора до штампа соответственно были от 0,2 до 5 м. При проведении наблюдений были получены определенные углы наклона, которые соответственно связаны с упругими деформациями. Представительность измерений более 100 и выбраны они из трех различных климатических площадок.

На рис. 2 даны графики реальной закономерности перемещения вертикальной осадки грунта на разных расстояниях от штам-

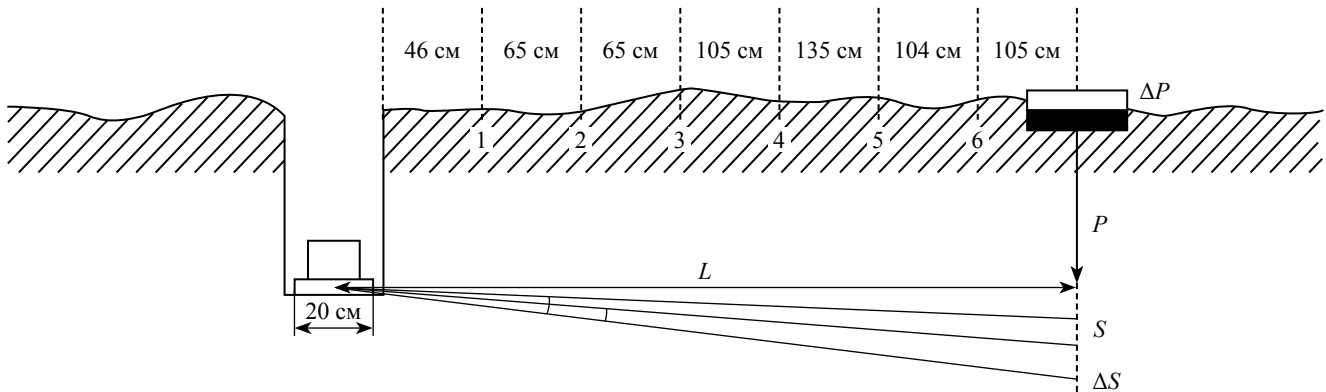


Рис 1. Схема расположения прибора и штампа:

L — расстояние от штампа до прибора; P — вес штампа; ΔP — смещение штампа под просадкой грунта; S — расстояние прибора до проекции штампа; ΔS — смещение штампа после нагрузки

па и сравнение их с классической кривой по Буссинеску.

Вычисляя модель упругости или модуль общей деформации по нескольким типам грунтов, используем формулу для определения модуля E квадратного штампа $E = 0,9(1 - \sigma^2)P/aW$, где W — вертикальное перемещение штампа. В итоге [3] можем определить соотношение $E_2/E_1 = 1,25$. Это отношение между деформациями образцов грунтов для самого поверхностного слоя. С глубиной на 85 см оно изменяется и равно 2 мм, а на глубине 1,5 м модуль деформации E_2 в 2,5 раза больше E_1 .

Данные зависимости являются эмпирическими, но для прогнозирования вертикальных деформаций инженерных сооружений по схеме линейно-деформируемого слоя (2), определяются по формуле

$$H_{\text{расч}} = (H_{\sigma} + \psi_b)k_p,$$

где H_{σ} — толщина слоя; ψ — коэффициент определенного свойства грунта; k_p — табличный коэффициент.

Осадку определяют по формуле

$$S = \frac{bPk_c}{k_m} \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E},$$

где k_c и k_m — табличные коэффициенты, соответственно зависящие от отношения упругого слоя $H_{\text{расч}}$ к половине ширины радиуса штампа, ширины штампа b и значения E ; k_i — табличный коэффициент, определяемый относительной глубиной залегания слоя.

Данные расчетные измерения используют при расчетах предельной нагрузки на фун-

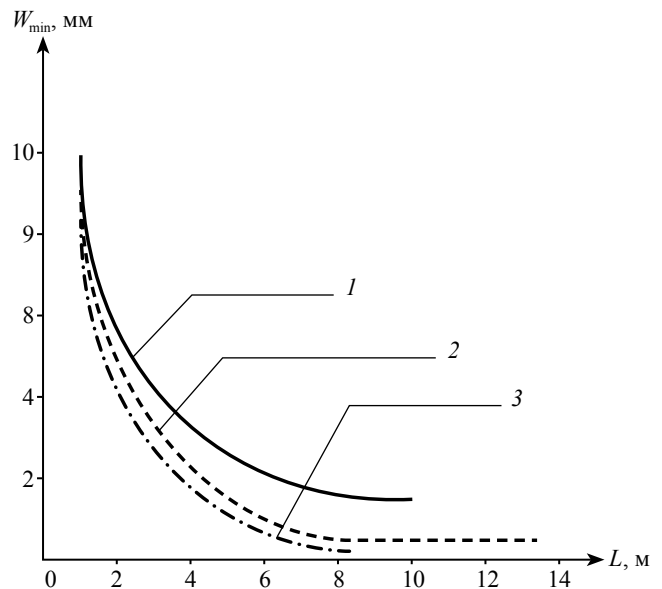


Рис. 2. График реальной закономерности перемещения вертикальной осадки грунта на разных расстояниях от штампа:

W_{min} — перемещение вертикальной осадки грунта; L — расстояние от штампа до прибора; 1 — кривая Буссинеска; 2 — вертикальная осадка грунта (песок); 3 — вертикальная осадка грунта (суглинок)

дамент и являются альтернативой геодинамическим наблюдениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капустян Э.С. Разрушение и повреждения бетонных плотин на скальных основаниях. М., 1997.
2. Кроличенко В.Ф. Определение смещений и абсолютной осадки сооружений методом наклономерных наблюдений // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2000. — №5. — С.52–54.
3. СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (Актуализированная версия) СП 47.13330.2012/ Минстрой России М.: ГПЦГШ, 1996.—70 с.

Принята к печати 12 октября 2014 г.
Рекомендована кафедрой геодезии МИИГАиК

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА МОНИТОРИНГА И АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПУНКТАХ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕФЕРЕНЦНЫХ СЕТЕЙ

Профессор, доктор техн.наук Ю.И. Маркузе, профессор, доктор техн.наук Х.К. Ямбаев

Московский государственный университет геодезии и картографии

yambaev@miigaik.ru

Аннотация. Основное внимание уделено возможности организации геодезического мониторинга движений земной коры по результатам спутниковых измерений на постоянно действующих пунктах региональных референчных сетей (РРС), которыми являются базисные векторы (Base Line) с их корреляционными матрицами. При уравнивании каждого цикла выполняется последовательное объединение всех циклов с вычислением уточнённой корреляционной матрицы текущего цикла. Деформации устанавливаются как недопустимые разности одноимённых координат X , Y , Z пунктов с применением необходимого статистического критерия. Их вычисления выполняются как в пространственной системе координат на эллипсоиде WGS-84, так и на плоскости на эллипсоиде Красовского в проекции Гаусса–Крюгера. В случае отсутствия реальных измерений, но имея предполагаемый проект сети, целесообразно выполнить их моделирование в каждом цикле, установить какой минимальной величиной можно определить деформации на каждом пункте, выполнить все необходимые вычисления и сравнить заданные деформации с полученными.

Ключевые слова: линейно-угловые сети, оценка точности, рекуррентное уравнивание, моделирование спутниковых и геодинамических сетей

Abstract. The main attention in the report is paid to possibility of the organization of geodetic monitoring of earth movements by results of satellite measurements on constantly operating points of the regional reference networks (RRN) which are basic vectors (Base Line) with their correlation matrices. When equalizing each cycle a consecutive association of all cycles with calculation of the specified correlation matrix of the current cycle is carried out. Deformations are established as inadmissible differences of X , Y , Z coordinates of the points with application of necessary statistical criterion. Their calculations are carried out both as in spatial system of coordinates on WGS-84 ellipsoid, and in plane of Krasovsky's ellipsoid in Gauss-Krueger's projection. In case of lack of real measurements, but with an estimated project of a network, it is expedient to execute their modeling in each cycle, to define minimum possible size of deformations on each point, to execute all necessary calculations and to compare the precalculated deformations to the received ones.

Keywords: linearly-angular networks, accuracy estimation, recurrent adjustment, simulation of satellite and geodynamical networks

Проектирование, строительство и эксплуатация таких крупных сооружений, как атомные электростанции (АЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), магистральные нефтепроводы и т. п., эффективная и безопасная эксплуатация которых критична к плано-высотным деформациям основания и стабильности пространственного положения технологического оборудования, требуют соответствующего выбора промышленных площадок в геологическом отношении и проведения инструментального геодезического мониторинга движений земной коры выбранной территории на всех стадиях жизненного цикла таких сложных сооружений вплоть до периодических наблюдений за положением оборудования в процессе эксплуатации.

В свое время на территории СССР была создана сеть (около 50) геодинамических полигонов (ГДП), на которых проводились повторные высокоточные плано-высотные из-

мерения в течение более чем 30 лет. Анализ результатов выполненных повторных нивелировок по программе I класса позволил в 1969 г. создать карту современных вертикальных движений земной коры территории СССР, стран Восточной Европы и Монголии. Особое внимание было уделено территориям проектируемых и строящихся крупных инженерных сооружений в атомной и гидроэнергетике. К сожалению, в настоящее время эти работы на ГДП резко сократились или вовсе не ведутся.

Однако следует отметить важность проведения геодезического мониторинга движений земной коры в зоне строительства крупных инженерных сооружений промышленного, энергетического, спортивно-зрелищного и т.п. назначения, что относится к регионам с высокой тектонической и сейсмической активностью. При этом результаты геодезического мониторинга должны учитываться не только

при изысканиях (выбор месторасположения возводимых объектов), но и при проектировании, строительстве и эксплуатации таких сооружений, тем более что современная технология геодезических измерений настолько совершенна, что позволит организовать практически непрерывный геодинамический мониторинг в реальном масштабе времени. Особенно перспективные возможности предоставляют ГЛОНАСС/GPS-технологии, следящие системы на базе компьютеризированных и моторизованных электронных тахеометров и цифровых нивелиров, лазерных трекеров и т.д. Современные средства оперативной связи, компьютерной обработки большого массива данных и их интерпретации позволяют весь комплекс геодезических, геофизических, гравиметрических и других данных автоматически передавать в единый аналитический центр для оперативного принятия решений и разработки мероприятий по уменьшению риска и последствий от опасных явлений природного и техногенного характера.

Созданная в конце восьмидесятых годов XX в. карта СВДЗК в определённой степени отражает происходящие процессы в земной мантии, но для статистической связи деформаций с характером сейсмического режима необходимо продолжать эти исследования путём повторных измерений по всем первоначально проложенным трассам. В последние 25 лет инструментальный геодезический мониторинг движений земной коры практически прекратился.

Инструментальный геодезический мониторинг движений земной коры в очагах землетрясений выявляет закономерность изгибаний земной поверхности до и после землетрясений. Результаты повторных нивелировок неоспоримо свидетельствуют о тесной корреляционной связи между движениями земной коры и сейсмоактивностью той или иной зоны возникновения очага землетрясений.

Развитие современных спутниковых технологий координатных определений на основе GPS/ГЛОНАСС-измерений коренным образом изменяют принцип построения геодезических сетей на геодинамических полигонах с целью изучения деформаций земной коры. Эти изменения в основном сводятся к следующему:

по результатам измерений на каждом пункте с высокой точностью определяются все три координаты, т.е. пространственное положение геодезического пункта;

возможна реализация непрерывных наблюдений и передачи информации в единый центр данных в масштабе реального времени (мониторинг), тем самым осуществляется регистрация деформации и оперативный контроль их критической величины;

анализ результатов непрерывных GPS-измерений (как индикаторов динамики деформаций) является основой для регламентации частоты (цикличности) более подробных деформационных измерений повторными наземными методами или GPS/ГЛОНАСС-технологиями;

высокая степень свободы выбора местоположения пункта (возможность расположения непосредственно в ослабленных зонах по линии разлома и в то же время легко доступного);

возможность высокоточного определения взаимного положения точек физической поверхности Земли, удаленных друг от друга на значительные расстояния.

Таким образом, по результатам непрерывных GPS-измерений определяются количественные характеристики деформаций земной коры в местах наиболее активных разломов (ослабленных зон); устанавливается необходимость, точность и цикличность повторных нивелировок, формируется специальная геофизическая аппаратура: деформографы, наклонометры др.

В результате может быть создана практически автоматизированная система геодинамического мониторинга деформационных процессов, в том числе и регистрации величин деформаций в масштабе реального времени (рис. 1).

Эти новые возможности современных спутниковых геодезических технологий при изучении деформаций земной коры, дают следующие преимущества по сравнению с традиционными методами геодезии на геодинамических полигонах.

1. При традиционных методах геодезических измерений на каждом из подобных геодинамических полигонов Роскартографии развивалась сеть из 20–30 пунктов триангуляции,

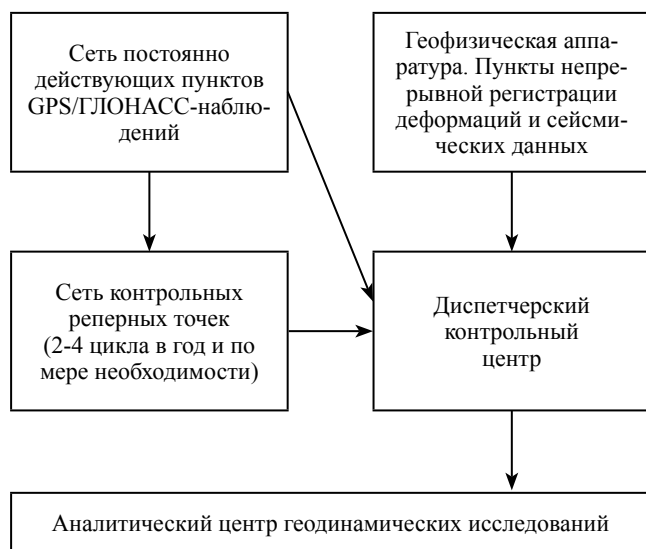


Рис. 1. Структура системы деформационного мониторинга

расположенных, как правило, на вершинах гор или других труднодоступных местах. Эти условия расположения пунктов приводили к большим сложностям организационного характера и значительным экономическим затратам. Одновременно создавалась сеть высотных пунктов вдоль дорог или по долинам рек. Это приводило к тому, что сеть триангуляции и нивелирная сеть развивались независимо друг от друга, что затрудняет последующий анализ деформаций. Стоимость только одного цикла измерений с последующей обработкой на таком полигоне составляет порядка 25 млн руб.

2. При использовании классической (традиционной) схемы геодинимических работ организация повторных измерений на каждом полигоне возможна на интервале в лучшем случае в 1–5 лет. Тем более, что проведение одновременно измерений по всем пунктам полигона практически невозможно. Поэтому вероятность уловить момент активизации деформационных процессов очень мала, а изучение же процесса подготовки возможных землетрясений практически нереально.

3. Построение непрерывного мониторинга деформационных процессов, основанного на применении современных спутниковых технологий, вовсе не означает отказ от использования уже накопленного информационного потенциала на основе традиционных геодезических методов. Все эти данные изучаются и используются при создании новых геодези-

ческих построений. Мало того, при создании спутниковой системы контрольных точек могут быть максимально использованы геодезические пункты (главным образом нивелирные репера), уже созданные Роскартографией на той или иной территории. Метод повторного нивелирования был и остается наиболее точным, а следовательно, наиболее объективным методом изучения вертикальных движений земной коры.

Центральным узлом всего комплекса непрерывного мониторинга будет являться сеть из пунктов постоянных GPS/ГЛОНАСС-наблюдений за деформациями, расположенных, как правило, в районе населенных пунктов, на железнодорожных станциях, порталах тоннелей, мостов и т.п. На этих постоянно действующих пунктах GPS/ГЛОНАСС-наблюдений будут установлены спутниковые приемники для непрерывной регистрации практически с любыми интервалами. Данные наблюдений в масштабе реального времени будут передаваться в единый диспетчерский контрольный центр. В этом центре в автоматизированном режиме на основе специализированного программного обеспечения будут регистрироваться величины деформаций (изменения координат во времени по четырем составляющим X , Y , Z и T). Эти величины в виде непрерывных графиков во времени будут являться текущим контрольным отчетным материалом диспетчерско-аналитического центра. На специализированном сайте центра будут помещаться сами результаты GPS/ГЛОНАСС-измерений. Это позволит в режиме постобработки выполнить высокоточные определения координат для обеспечения многих других задач — кадастра, геодезического обеспечения строительства, топосъемок и т.п. различными организациями.

Файлы с измерениями на GPS-пунктах передаются с компьютеров на центральный сервер, установленный в диспетчерском центре по запросам, генерируемым ежесуточно в автоматическом режиме. На центральном сервере осуществляется фильтрация и первичная архивация данных, поступающих со станций, а затем предварительная обработка с помощью специализированного программного обеспечения (GAMIT/GLOBK) массива данных по всему данному региону.

В настоящее время все шире развиваются региональные спутниковые координатно-навигационные системы хозяйственного назначения для обеспечения крупномасштабных топографических съемок, для решения задач землепользования (кадастров различного назначения, разбивочных работ и исполнительных съемок в строительстве, навигации и т.п.). Как правило, такие референц-системы представляют собой совокупность значительного количества постоянно действующих ГЛОНАСС/GPS геодезических пунктов. При надлежащем расположении и закреплении пунктов референц-сетей в городах и на территориях регионов, при введении в их компьютерно-телекоммуникационную систему блока деформационного мониторинга и некоторых других доступных по стоимости обременений такие региональные референц-системы (РРС) также могут быть одним из реальных путей геодезического мониторинга, особенно в сейсмоактивных регионах.

Таким образом, при надлежащем отношении органов государственной власти регион может получить возможность организации геодезического мониторинга с минимальными финансовыми вложениями. Разработку такого геодезического блока, обязательного в составе региональной референц-системы, возможно осуществить на примере действующих РРС в Московской, Новосибирской областях и особенно в таких сейсмоактивных регионах, как Северо-западный Кавказ, Байкальская рифтовая зона и т.п.

Алгоритм анализа деформаций земной коры. Наряду с разработанными в последние годы подходами, метод, разработанный в [1] успел зарекомендовать и доказать свою практическую значимость. Решающие достоинства метода заключены в применении рекуррентного алгоритма контроля грубых ошибок, а также последовательного объединения циклов с целью повышения точности определения деформаций.

Обычно при обработке измерений, сравнивая результаты текущего цикла с первым, полученные разности объявляют деформациями. При этом не применяют никаких статистических критериев. Дело в том, что эти разности могут быть следствием не только деформаций, но и случайными ошибками измерений.

Поэтому прежде чем начинать измерения, составив проект сети, необходимо оценить точность всех её пунктов, с тем чтобы установить какие минимальные деформации можно выявить при заданной точности измерений

$$d_{\min} = \pm t\sigma_0\sqrt{2Q_{s-1}}, \quad (1)$$

где Q_{s-1} — обратный вес пункта в слабом месте сети, полученный в результате уравнивания первого цикла измерений.

С целью повышения точности определения деформаций, целесообразно выполнить объединение текущего цикла наблюдений s со всеми предыдущими.

Для этого необходимо составить матрицу обратных весов

$$Q = \begin{pmatrix} \bar{Q}_{s-1} & 0 \\ 0 & Q_s \end{pmatrix}, \quad (2)$$

в которой блок $\bar{Q}_{s-1}$ относится к неизвестным $\bar{x}_{s-1}$ уже объединенных циклов 1, ..., $s-1$, а блок Q_s к текущему. Учитывая по рекуррентной формуле все условные уравнения вида

$$\delta x_j^{s-1} - \delta x_j^s + w_j = 0, \quad (3)$$

составляемые для стабильных одноимённых пунктов, как избыточные уравнения поправок с $1/p=0$ и невязкой $w_j = \bar{x}_j^{s-1} - x_j^s$, получим искоемую матрицу $\bar{Q}_s$, вектор $\bar{x}_s$ и квадратичную форму $\bar{\Phi}_s$. Если обнаруживается, что невязка w недопустима, то она признаётся деформацией и соответствующее условное уравнение не учитывается.

Отметим, что если сдвиги пунктов не обнаружены и проект сети во всех циклах одинаков, то

$$\bar{Q}_s = \frac{1}{s} Q_{s-1}.$$

Важно, что при объединении циклов повышается точность определения координат даже тех пунктов, которые признаются подвижными благодаря учёту в этой процедуре их корреляции с координатами неподвижных пунктов [1].

Приведём небольшой пример. При уравнивании первого цикла измеренных превышений в нивелирном ходе (рис. 2) получена матрица обратных весов отметок двух определяемых реперов 2 и 3, равная $Q = \begin{pmatrix} 0,667 & 0,333 \\ 0,667 \end{pmatrix}$.

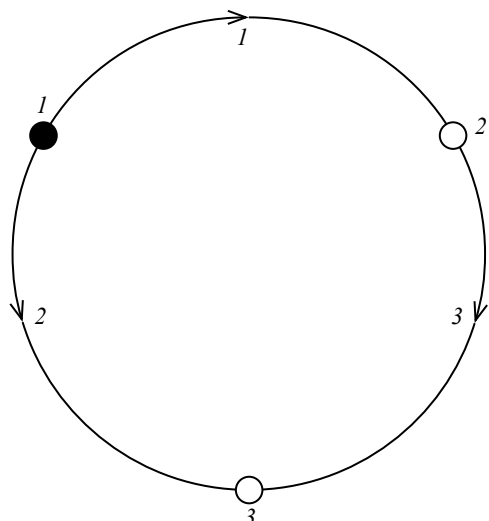


Рис. 2. Схема нивелирного хода

После уравнивания второго цикла этого же хода составляется матрица

$$Q_{1-2} = \begin{pmatrix} 0,667 & 0,333 & 0 & 0 \\ & 0,667 & 0 & 0 \\ & & 0,667 & 0,333 \\ & & & 0,667 \end{pmatrix}.$$

Допустим, что соответствующий статистический критерий, применённый к невязке условного уравнения, составленного для репера 2 обнаружил, что этот репер изменил своё положение, а репер 3 остался стабильным, тогда составляем условное уравнение (3) с матрицей коэффициентов $A = (0 \ 1 \ 0 \ -1)$. Затем по рекуррентной формуле для учёта избыточных измерений

$$Q_i = Q_{i-1} - Z_i^T N_i^{-1} Z_i,$$

где $Z_i^T = Q_{i-1} A_i^T$; $N = P_i^{-1} + A_i Z_i^T$, вычисляем вектор-строку $Z = (0,333 \ 0,667 \ -0,333 \ -0,667)$, учитывая, что при учёте условных уравнений матрица обратных весов всегда $P^{-1} = 1/p = 0$, вычисляем величину $N = 1,334$ и, наконец, матрицу

$$Q = \begin{pmatrix} 0,584 & 0,167 & 0,083 & 0,171 \\ & 0,333 & 0,167 & 0,333 \\ \text{sim} & & 0,584 & 0,167 \\ & & & 0,333 \end{pmatrix}.$$

Её блок $\hat{Q}_{s-1} = \begin{pmatrix} 0,584 & 0,167 \\ \text{sim} & 0,333 \end{pmatrix}$ представляет матрицу двух первых объединённых циклов.

Как видно, повышается точность даже нестабильного репера 2.

Недостатком изложенного алгоритма является необходимость получать обратные матрицы в (2) и при учёте каждого i -го условия для стабильных пунктов работать с матрицей структуры

$$Q_i = \begin{pmatrix} (Q_{s-1})_i & (Q_{s-1},s)_i \\ \text{sim} & (Q_s)_i \end{pmatrix}.$$

Причём правый верхний блок этой матрицы не является конечным продуктом, что впоследствии может потребовать значительного объёма вычислений. Подробное более эффективное решение этой проблемы подробно изложено в [1].

Моделирование и анализ деформационных сетей GPS. В период отсутствия реальных измерений с целью анализа точности и величин определяемых деформаций следует на основе уже известного проекта сети смоделировать GPS-измерения (дифференциальный метод). Это можно выполнить с помощью специальной программы SIMGPS.

Для этого программным путём для первого цикла наблюдений следует создать файл имён пунктов и соответственно им координаты и высоты x, y, H , например, в системе координат СК-42 на эллипсоиде Красовского. При этом первым должен быть пункт, который при последующем уравнивании принимается фиксированным.

Номера пунктов	Координаты		
	x	y	H
1	4826450	7562000	150,0
2	4820250	7569700	503,7
3	4839850	7561650	813,5
4	4808000	7578000	141,3
5	4829000	7583200	838,7
6	4820000	7581000	465,4
7	4828800	7596500	777,5
8	4840050	7597500	853,9
9	4832500	7618500	2020,0

Координаты y представлены в седьмой шестиградусной зоне.

Далее по цепочке преобразования $xyH \rightarrow BLH \rightarrow XYZ$ они с помощью программы TERSPACE преобразуются в прямоугольные координаты на том же эллипсоиде (Красовского или на другом, если имеются семь параметров преобразования). С целью моделиро-

вания, учитывая малые деформации, можно выбрать любой эллипсоид.

С помощью той же программы SIMGPS далее необходимо ввести связи между пунктами, то есть указать линии, по которым будут выполнены измерения базисных векторов (именно эти линии образуют сеть на рис. 3).

Кроме этого вводятся также величины средних квадратических ошибок (СКО), характеризующие точность измерений (приращений координат) по всем трём осям координат. При моделировании они были приняты одинаковыми для всех 15 линий и равными 0,002 м по осям X и Y и 0,004 м по оси Z . Коэффициенты корреляции все были приняты равными нулю, как показывают наши исследования, они несущественно влияют на результаты уравнивания.

По координатам всех пунктов и указанным связям программа вычисляет истинные значения приращений координат и с помощью указанных показателей точности в них вводятся распределённые по нормальному закону распределения истинные ошибки. Таким образом получаются их модельные измеренные значения.

Наконец, с помощью программы GPSADJUST необходимо выполнить уравнивание сети GPS, образованную базисными векторами с их ковариационными матрицами с фиксацией одного первого пункта. Уравнивание



Рис. 3. Схема деформационной сети

выполняется в программе по рекуррентному алгоритму с контролем возможных грубых ошибок. Последним этапом вычислений является преобразование с помощью программы SPACETER по цепочке $X, Y, Z \rightarrow B, L, H \rightarrow x, y, H$ пространственных уравненных координат на плоскость. Результаты вычислений этого этапа, например, для первых трёх пунктов представлены на рис. 4.

Описанные выше процедуры все относятся к циклу $S=1$. При этом все файлы, которые с ним связаны, получают имена * — где знак (*) означает имя проекта, содержащее не более трёх символов, например, uam-1.

POINT	1	Name	"N1	"	ZONE	7
X =	3557728.649	Y =	2960770.312	Z =	4373788.674	
B =	43 34 15.8190	L =	39 46 2.9955	H =	150.0000	
x =	4826450.000	y =	7562000.000			
m(x) =	0.000	m(y) =	0.000	m(H) =	0.000	
POINT	2	Name	"N2	"	ZONE	7
X =	3556354.858	Y =	2969570.027	Z =	4369483.757	
B =	43 30 52.5014	L =	39 51 43.2420	H =	503.7014	
x =	4820250.004	y =	7569699.999			
m(x) =	0.002	m(y) =	0.001	m(H) =	0.002	
POINT	3	Name	"N4	"	ZONE	7
X =	3551133.754	Y =	2954987.775	Z =	4383947.546	
B =	43 41 30.0686	L =	39 45 52.8986	H =	813.5029	
x =	4839850.003	y =	7561649.999			
m(x) =	0.002	m(y) =	0.001	m(H) =	0.002	

Рис. 4. Результаты вычислений

```

1. POINT 7. N7
   Dx = 0.0139   Mx = 0.002
               Dy = 0.0108   My = 0.001
                               DN = 0.0136   MH = 0.002

2. POINT 8. N8
   Dx = 0.0163   Mx = 0.003
               Dy = 0.0095   My = 0.002
                               DN = 0.0184   MH = 0.003

3. POINT 9. N9
   Dx = 0.0163   Mx = 0.003
               Dy = 0.0122   My = 0.002
                               DN = 0.0162   MH = 0.003
    
```

Рис. 5. Результаты анализа деформаций

Моделирование цикла 2. С помощью программы SIMGPS, начиная с цикла 2, на дисплей выводятся имена всех пунктов и выбираются пункты, в координаты которых на плоскости вводятся деформации, для того чтобы их начертить выводятся также средние квадратические ошибки координат. После этого вновь вычисляются пространственные координаты пунктов и вновь вычисляются новые значения «измеренных» базисных векторов, выполняется их уравнивание как и в цикле первом. Затем с помощью программы GPSDEF выполняется анализ деформаций, также с применением рекуррентного уравнивания и программой DEFSHEMA строятся графики деформаций для всех нестабильных пунктов по всем трём осям.

Так, в нашей модели были заданы деформации для пунктов № 7–9, равные 0,013; 0,010; 0,012 соответственно по осям x , y , H . В резуль-

тате анализа получены следующие деформации, близкие к заданным (рис. 5, 6).

При обработке реальных GPS-измерений работает тот же алгоритм и программы с тем различием что отпадает необходимость моделирования базисных векторов и что все вычисления выполняются в системе координат WGS-84.

На основе изложенных алгоритмов выполнен анализ деформаций на Московском геодинамическом полигоне. Для решения поставленных задач использованы компьютерные программы, получившие свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2002610160, выданное Российским агентством по патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ) 8 февраля 2002 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркузе Ю.И., Голубев В.В. Теория математической обработки геодезических измерений. М.: Академический Проект; 2010. – 247 с.
2. Маркузе Ю.И., Ямбаев Х.К. Анализ плановых и высотных деформаций по GPS-измерениям / Сб. статей по итогам научно-технической конференции, посвящённой 230-летию основания МИИГАиК, Вып. 2. Ч. I 2009. – С. 9–11.
3. Маркузе Ю.И., Бондаренко А.А. Эффективная обработка геодезических данных локальной спутниковой геодинамической сети // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъёмка». 2013. – №4. – С. 14–19.

Принята к печати 8 октября 2014 г.
Рекомендована кафедрой геодезии МИИГАиК



Рис. 6. График деформации по оси x для точки №7

УДК 528.7; 528.711.1

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ГЕОДАНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗУЧЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СПУТНИКА ЮПИТЕРА ГАНИМЕД ПО ДАННЫМ МИССИЙ ГАЛИЛЕО И ВОЯДЖЕР-1, -2

Научный сотрудник **А.Э. Зубарев**, научный сотрудник **И.Е. Надеждина**,
инженер **В.Д. Патратий**, инженер **Л.А. Митрохина**, мл. научный сотрудник **А.А. Коханов**,
кандидат техн. наук **И.П. Карачевцева**, профессор **Ю. Оберст**
Московский государственный университет геодезии и картографии
i_karachevtseva@miigaik.ru

Аннотация. Представлены результаты обработки данных дистанционного зондирования спутника Ганимед, собранные в базу геоданных. С использованием процедур SPICE выполнены расчет элементов внешнего ориентирования и предварительная фотограмметрическая обработка космических изображений, выбранных по наилучшему разрешению и качеству. Формирование единого пространственно-координированного покрытия исследуемого спутника обеспечивает базовую основу для получения фундаментальных геодезических параметров тела, а также последующих задач изучения и пространственного анализа характеристик поверхности на основе методов моделирования в ГИС. Исследования, выполненные на основе съемки космических аппаратов Галилео и Вояджер-1, -2, обеспечивают возможность планирования научных экспериментов для целей будущей российской миссии Лаплас-П в систему Юпитера [1].

Ключевые слова: миссия Лаплас-П, Ганимед, КА Галилео, Вояджер-1, -2, обработка космических изображений планет и спутников Солнечной системы, база геоданных

Abstract. The paper presents the results of the image processing of Ganymede remote sensing data collected into geodatabase. Preliminary calculation is carried out using SPICE procedures of exterior orientation and photogrammetric processing of images selected for the best resolution and quality. Based on spatial context the coverage provides a basic framework for the solution of problems of further study of the physical parameters of the body and geanalysis of surface characteristics including modeling in GIS. The outcomes based on data from Galileo, Voyager-1 and -2 provide planning scientific experiments for the future Russian mission Laplace-P to Jovian system [1].

Keywords: mission Laplace-P, Ganymede, remote sensing, Galileo, Voyager-1 and -2, image processing of the Solar system planetary data, geodatabase

Введение. Базовые геодезические параметры (модель фигуры и элементы вращения) спутников внешних планет до настоящего момента еще плохо изучены, и достоверные знания о глобальном рельефе Галилеевых спутников отсутствуют. Это вызвано тем, что предыдущие опорные сети для этих тел создавались по данным Вояджер-1,2 и Галилео без учета высотной составляющей. Между тем, Галилеевы спутники представляют большой интерес ввиду планируемых миссий: JUICE (Европейское космическое агентство) и Лаплас-П (РОСКОСМОС).

Ганимед — один из четырех галилеевых (открытых Галилео Галилеем) спутников Юпитера — крупнейший и уникальный спутник в Солнечной системе, поскольку обладает собственной магнитосферой [2]. На поверхности Ганимеда наблюдаются два типа ландшафта: треть спутника — это темные области, испещрённые ударными кратерами, а остальную площадь занимают более молодые светлые территории, покрытые бороздами и хребтами [3]. Причины сложного геологического строения светлых областей до конца не ясны, вероятно, они связаны с тектонической активностью, вызванной приливным нагревом [4].

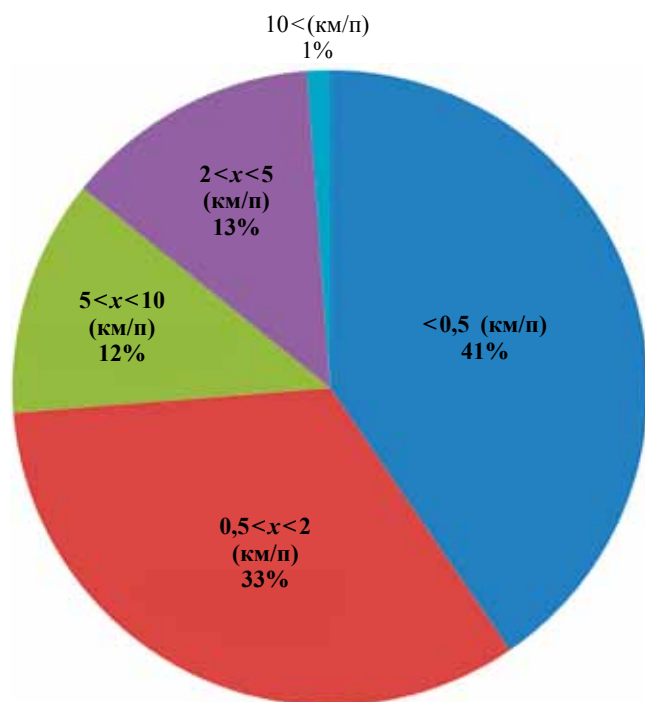


Рис. 1. Характеристика изображений спутника Ганимед по разрешению (км/пиксель)

Формирование опорной сети и моделирование рельефа необходимо для изучения фундаментальных характеристик и поверхности небесных тел. С этой целью нами разрабатываются методика и технология обработки разномасштабных и разновременных изображений, что является сложной научно-технической задачей ввиду больших различий между типами съемочных систем и условиями съемки спутников внешних планет. Создаваемая технология обеспечивает создание глобальных трехмерных опорных сетей удаленных тел Солнечной системы по разновременным космическим изображениям с разным масштабом и освещением, а также большими углами наклона.

Оценка и анализ изученности спутника Юпитера Ганимед. За всю историю космической эры система Юпитера изучалась несколько раз: автоматической межпланетной станцией серии Пионер — первые данные о спутниках Юпитера (1973–1974 гг.); космическими аппаратами (КА) серии Вояджер, которые обеспечили первые качественные снимки поверхности (1979 г.), и, наконец, миссией Галилео, в рамках которой осуществлялось целенаправленное исследование системы

Юпитера (1995–2003 гг.). КА Новые горизонты (2007 г.) и КА Кассини выполнили наблюдение спутников при пролете через систему Юпитера, а телескоп Хаббл обеспечил съемку тел с орбиты Земли.

Из всех вышеперечисленных миссий только данные КА Вояджер-1, -2 и КА Галилео имеют достаточное разрешение для исследования поверхности небесных тел системы Юпитера (рис. 1). Научные камеры КА Галилео (<http://solarsystem.nasa.gov/galileo/facts.cfm>) и КА Вояджер-1,-2 (<http://voyager.jpl.nasa.gov/spacecraft/instruments.html>) с различными характеристиками обеспечили получение как панхроматических, так и цветных изображений поверхности галилеевых спутников, которые находятся в системе хранения планетных данных (Planetary Data System, PDS) (<http://pds-imaging.jpl.nasa.gov/search/search.html#QuickSearch>). Краткое описание параметров собранного массива данных дистанционного зондирования Ганимеда представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сводные характеристики космических изображений спутника Ганимед, полученных разными КА

Галилео (116 шт.)			Вояджер-1 (204 шт.)			Вояджер-2 (210 шт.)		
Разрешение, км/пиксель								
макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.
0,02	17,10	0,86	6,59	17,96	8,27	3,74	17,82	5,12

На основе космических изображений Ганимеда, полученных КА Галилео и КА Вояджер-1, 2, в RAND Corporation (США) ранее была выполнена их фотограмметрическая обработка с формированием опорной сети. Характеристики сети опорных точек Ганимеда и параметры фигуры, полученные по результатам этих исследований (по состоянию на 1998 г.) приведены в табл. 2. На основе этих данных в 2002 г. американской геологической службой USGS (United States Geological Survey) созданы глобальная ортомозаика и фотокарта исследуемого тела (<http://geopubs.wr.usgs.gov/i-map/i2762/>), а в 2014 г. на основании этих данных в USGS (<http://pubs.usgs.gov/sim/3237/>) разработана новая геологическая карта Ганимеда [5].

На абсолютную достижимую точность опорной сети исследуемого тела оказывают

Параметры предыдущей контрольной сети Ганимеда и фигуры, наилучшим образом аппроксимирующей небесное тело [8]

Характеристики	КА Галилео	КА Вояджер
Количество изображений, использованных для создания контрольной сети	39	302
Количество точек в контрольной сети	200	1921
Количество измерений связующих точек на всех изображениях	366	12921
Средний радиус аппроксимируемой сферы, км	2634,1	
Трехосный эллипсоид, км:		
<i>a</i>	2635,2	
<i>b</i>	2633,8	
<i>c</i>	2633,4	

существенное влияние ошибки используемых достижимых [6] и предварительных [7] элементов внешнего ориентирования (ЭВО). При оценке абсолютной точности данных КА Галилео величина ошибки положения аппарата не оказывает существенного влияния на предварительную ошибку используемых ЭВО. Оценка абсолютной точности данных КА Вояджер-1 и Вояджер-2 показала, что из-за неопределенности моментов съемки и значительной скорости аппаратов ошибки могут достигать десятков километров, что оказывает значительное влияние как на достижимую точность определения положения аппарата, так и на точность опорной сети.

Абсолютная погрешность координат точек опорной сети, построенной на основе снимков с предварительно вычисленной точностью, может быть определена в ходе уравнивания. Предварительные оценки координат опорных точек, основанные на использовании предварительных (априорных) ошибок положения КА Галилео и Вояджер-1 и 2, позволяют сделать вывод о достижимой абсолютной точности опорной сети $\pm 5\text{--}10$ км. Точность взаимного положения точек опорной сети будет выше в корень из числа измерений, приходящихся на каждую точку.

Возможность формирования современной уточненной опорной сети и создание новой глобальной ортомозаики Ганимеда обеспечивает также постоянное обновление базы данных SPICE (<http://naif.jpl.nasa.gov/naif/data.html>), содержащей эфемериды космических аппаратов, что дает возможность уточнения элементов внешнего ориентирования космических изображений [9]. Следует также отметить, что в результате уравнивания опорной сети в процессе фотограмметрической обра-

ботки возможно получение улучшенных элементов внешнего ориентирования, что обеспечит более достоверное положение объектов и измерение высот.

Таким образом, выполненный анализ исходных данных и результатов предыдущих исследований, представленных в табл. 1 и 2, а также предварительная обработка космических изображений показали, что существует возможность создания новой опорной сети Ганимеда на основе сгущения сети опорных точек с использованием данных КА Галилео, как имеющих наилучшее разрешение и качество изображений, и получение улучшенных по точности отдельных ортоизображений, а также глобальной ортомозаики исследуемого тела.

Предварительная обработка космических изображений Ганимеда и формирование базы геоданных. Для осуществления посадки спускаемого аппарата на поверхность Ганимеда необходима как можно более детальная и точная информация о характере рельефа выбранного участка. Для координатно-картографического обоснования выбора мест посадок необходимо оценить изученность тела и степень покрытия изображениями с различным разрешением. Для исследования данной характеристики, по результатам выполненного сбора и анализа космических изображений, а также с использованием вычисленных элементов внешнего ориентирования, выполнена предварительная обработка данных дистанционного зондирования Ганимеда. Предварительные ЭВО, необходимые для ортотрансформирования изображений, вычислялись с помощью программного комплекса SPICE (http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/toolkit_docs/C/cspice/index.html) на основе орбитальных данных о положении космического аппарата в момент съемки [8].

С учетом анализа данных съемки (см. табл. 1) отобраны 229 космических изображений Ганимеда с наилучшим разрешением – от 20 м до 35 км на пиксель (117 шт. КА Галилео и 112 шт. КА Вояджер-1, 2). В целом, среднее разрешение изображений составляет ~5–10 км/пиксель. При отборе данных, в соответствии с целями и задачами исследования, были поставлены несколько условий: максимальное покрытие поверхности спутника; наилучшее разрешение данных; наилучшее качество изображений.

В результате предварительной фотограмметрической обработки в ПО PHOTOMOD (<http://www.racurs.ru/?page=515>) получены геореференцированные ортоизображения Ганимеда, которые были собраны в единую пространственную базу данных (рис. 2). Трансформирование выполнено на сферу с радиусом 2631,2 км — параметры фигуры Ганимеда, рекомендованные Международным астрономическим союзом, МАС [10]. Отдельные изображения, хранящиеся в базе геоданных, образуют согласованное глобальное покрытие поверхности исследуемого тела. Для целей обоснования и выбора возможных мест посадки будущей миссии Лаплас-П ре-

зультаты обработки данных дистанционного зондирования Ганимеда классифицированы по разрешению на 4 группы (табл. 3).

Как видно на рис. 2, некоторые участки поверхности покрыты изображениями с достаточно высокой степенью детальности — с разрешением от 20 до 300 м/пиксель, их площадь составляет около 1 млн км² (см. табл. 3). Созданная база геоданных позволяет оценить наличие изображений Ганимеда на различные участки его поверхности и выделить районы с наилучшей изученностью для целей планирования миссии Лаплас-П.

Таблица 3

Характеристика изученности Ганимеда по данным дистанционного зондирования КА Вояджер-1, 2 и КА Галилео

Группа	Разрешение изображений, км/пиксель	Площадь покрытия, км ²
1	0,02–0,30	1 072 090,6
2	0,3–1,0	29 956 607,4
3	1,0–3,0	40 045 221,4
4	> 3,0	15 718 538,4

Закключение. Для решения проблемы координатной и картографической поддержки будущей российской миссии Лаплас-П собраны и обработаны доступные космические

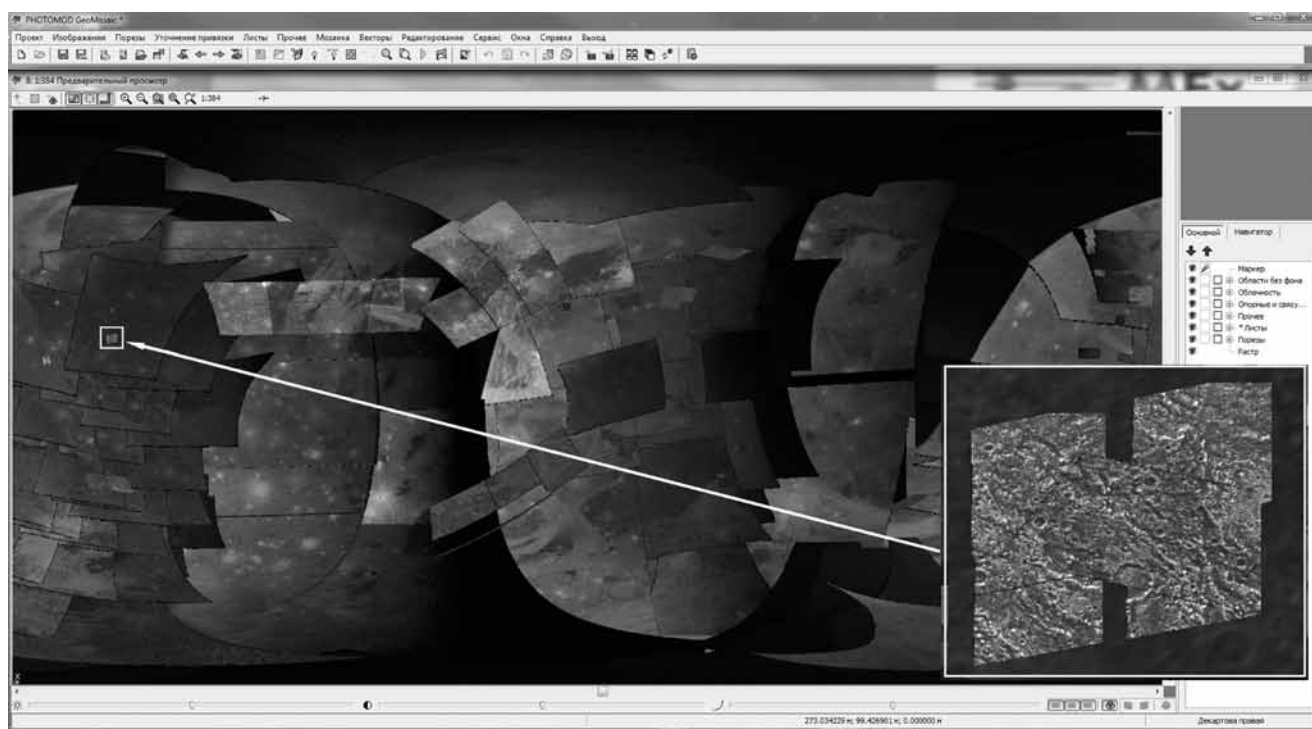


Рис. 2. Глобальное покрытие Ганимеда ортоизображениями с характеристиками по разрешающей способности (на врезке показан увеличенный фрагмент изображения с разрешением ~300 м/пиксель)

изображения КА Вояджер-1,-2 и Галилео с обоснованием возможности создания обновленной опорной сети спутника Ганимед. В результате анализа и обработки более 200 космических изображений Ганимеда получено пространственно-координированное положение участков поверхности с характеристиками разрешения покрывающих их изображений.

Направлением дальнейших работ является проведение полного технологического цикла обработки данных дистанционного зондирования Ганимеда с использованием разрабатываемой инновационной технологии автоматизированного создания трехмерных опорных сетей с использованием космических изображений, собранных за длительный период времени различными типами съемочных систем. Новая опорная 3D-сеть, глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) и ортомозаика, параметры которых получены нами в ходе предварительной обработки [11], обеспечат возможность уточнения фундаментальных геодезических параметров тела: модели фигуры и элементов вращения, включая вынужденную либрацию. Это также даст координатную и высотную основу для дальнейших исследований при планировании будущих полетов в систему Юпитера: моделирования и анализа поверхности в ГИС с целью получения различных характеристик небесного тела, включая уклоны и шероховатость рельефа, параметры освещенности [12], для обеспечения выбора возможных мест посадки спускаемого аппарата миссии Лаплас-П.

Работа выполнена в МИИГАиК при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-22-00197.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhukov D., Shingareva K., Zubarev A., Patraty V. Development of the coordinate and cartography support of future international mission "Laplace-P" to Jupiter's moon Ganymede. The Third Moscow Solar System Symposium, 8-12 October, 2012.
2. Kivelson M.G., Khurana K.K., Coroniti F.V. et al. The Permanent and Inductive Magnetic Moments of Ganymede. *Icarus*, 2002. – 157 (2). – p. 507–522.
3. Oberst J., Giese B., Zubarev A., Nadejdina I. Distribution patterns of bright and dark surface materials on Ganymede and correlations with topography and slopes. International Colloquium and Workshop "Ganymede Lander: scientific goals and experiments", Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia 4-8 March, 2013.
4. Patterson, G.W., Collins G.C., Head J.W., Pappalardo R.T., Prockter L.M., Lucchitta B.K., Kay J.E. Global geological mapping of Ganymede. *Icarus*, 2010, 207, 845-867, doi:10.1016/j.icarus.2009.11.035.
5. Collins, G.C., Patterson, G.W., Head J.W., Pappalardo, R.T., Prockter, L.M., Lucchitta, B.K., and Kay, J.P. 2014, Global geologic map of Ganymede: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3237 (<http://pubs.usgs.gov/sim/3237/>).
6. Jacobson R.A., Haw R.J. A comprehensive orbit reconstruction for the Galileo prime mission in the J2000 system, JPL, Pasadena, California, 1999.
7. James K. et al. Voyager Orbit Determination at Jupiter, *IEEE transaction*, on. 3, 1983.
8. Davies M.E. et al. The Control networks of the Galilean satellites and implications for global shape. *Icarus*, 1998, p. 375.
9. Зубарев А.Э., Патратуй В.Д. Эффективный инструмент для обработки данных дистанционного зондирования небесных тел – SPICE. // Изв. вузов «Геодезия и аэросъемка». – 2013. – № 1. – С. 59–63.
10. Archinal B. A., A'Hearn M. F., Bowell E. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2010.
11. Zubarev A., Nadezhdina I., Patraty V., Karachevtseva I., Kokhanov A., Kozlova N., Oberst J. New methodology for study of the basic geodetic parameters and relief of outer planetary bodies: Galilean satellites and Enceladus // The Fifth Moscow Solar System Symposium (5M-S3) IKI RAS, 13-18 October, 2014, 5MS3.
12. Zubarev A., Nadejdina I., Shishkina L., Zhukov D., Oberst J. Studies of illumination and Earth visibility for the surfaces of Ganymede and Callisto. International Colloquium and Workshop "Ganymede Lander: scientific goals and experiments", Space Research Institute, Moscow, Russia, 4–8 March, 2013.

Принята к печати 18 августа 2014 г.

ДЕШИФРИРОВАНИЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

Профессор, доктор геогр. наук **Ю.Ф. Книжников**, доктор геогр. наук **В.И. Кравцова**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

valentinamsu@yandex.ru

Аннотация. Показано, что учение о стереоскопической модели может активно развиваться в рамках ее использования для извлечения качественной информации об объектах съемки, т.е. дешифрирования. Рассмотрены вопросы о вертикальной деформации стереоскопической модели и о возможности дешифрирования так называемых «случайных» стереоскопических снимков, получаемых не в результате специальной стереосъемки.

Ключевые слова: стереоскопическая модель, дешифрирование аэрокосмических снимков, вертикальная деформация стереомодели

Abstract. It is shown that doctrine on stereoscopic model may be actively developed in connection with its application to extraction of quality information about the investigated objects, that is image interpretation. The problems of stereoscopic model's vertical deformation and of possibilities for interpretation of so called "occasional" stereoscopic images, taken not as result of special stereo survey, are discussed.

Keywords: stereoscopic model, interpretation of aerospace images, stereo model's vertical deformation

Введение. В прошлом веке при дистанционном определении пространственных координат точки объекта монопольные позиции занимала стереоскопическая модель, формируемая по фотоснимкам местности. Наиболее широко это применялось при картографировании. У нас в стране были созданы оригинальные аэросъемочные и обрабатывающие приборы универсального и дифференциального методов изготовления топографических карт по стереоскопическим аэрофотоснимкам. В фотограмметрии был выделен крупный раздел — стереофотограмметрия, в рамках которого рассматривались базовые свойства стереоскопической модели. К сожалению, в классической учебной фотограмметрической литературе отсутствует однозначное представление о стереоскопической модели. Так, проф. А.С. Скиридов [1] называет стереомоделью объемное изображение, возникающее при рассмотрении под стереоскопом сопряженной пары снимков. Он различает модели — геометрическую, которая образуется пересечением проектирующих лучей, и стереоскопическую, наблюдаемую исполнителем. Профессор А.Н. Лобанов [2] также различает две модели — действительную и видимую. Однако в отличие от Скиридова он называет модель, образованную пересечением проектирующих лучей, стереоскопической. Вообще говоря, профессионалы могут назвать около десятка пространственных моделей — психологическую, фотограмметрическую, геометрическую, оптическую, механическую и т. д., получаемых

различными способами по сопряженной паре снимков. Именно для их общего названия нами предложен один термин — стереоскопическая модель, несмотря на некоторое увеличение синонимии принятой терминологии [3].

Стереоскопическое дешифрирование аэрокосмических снимков. В последние десятилетия, когда практически сложились технологии лазерного сканирования и радиолокационной интерферометрии, значение стереоскопической модели как источника метрической информации о высоте поверхности местности значительно снизилось. В то же время извлекаемая из аэрокосмических снимков тематическая информация продолжает возрастать. Однако в такой дисциплине как дешифрирование снимков не выполнялись какие-либо значительные исследования по стереоскопическому моделированию. Таким образом, в настоящее время при фундаментальных разработках в области стереоскопической модели целесообразно сменить фотограмметрический аспект на дешифровочный. Известно, что для формирования метрической модели, предназначенной для последующих фотограмметрических измерений, требуется точное ориентирование снимков, а при их дешифрировании, когда из стереоснимков извлекается качественная геоинформация, вполне достаточно эту процедуру выполнять приближенно. Такое требование имеет определенное практическое значение, поскольку отраслевые специалисты значительно чаще используют снимки для дешифрирования, а не для фотограмметрических измерений.

Опыт географических исследований показывает, что при изучении взаимосвязей между компонентами геосистем, при оценке пространственного соотношения между ними и роли рельефа в этих взаимосвязях, более ценную информацию удаётся получить в процессе дешифрирования стереоскопических снимков. Вообще, использование стереоскопических снимков наиболее перспективно при изучении морфологии рельефа суши земной поверхности. Однако дешифрирование чаще выполняют по одиночным снимкам; к применению стереоскопических моделей обращаются только в отдельных случаях. Этому немало способствовало то обстоятельство, что после перехода от фотографической съёмки из космоса к обзорной сканерной космической стереосъёмке перестали выполнять, и только с развитием детальной цифровой сканерной съёмки вновь перешли к получению стереоснимков в варианте конвергентной съёмки. В настоящее время существует и другая немаловажная причина, ограничивающая стереоскопическое дешифрирование снимков — это высокая стоимость космических стереосъёмок. Напомним, что традиционные аэрофотоснимки, покрывающие сравнительно небольшую площадь на земной поверхности, всегда поставлялись стереопарами; космические же снимки с распространённых ресурсных спутников, охватывающие значительные площади, закупаются, как правило, одиночными, поскольку заказ стереосъёмки удваивает стоимость.

Деформация стереоскопической модели.

С геометрической точки зрения визуально наблюдаемая человеком плановая стереоскопическая модель по сравнению с действительностью не только уменьшена, но и закономерно анаформирована — постоянно деформирована по высоте. Эта особенность дешифрируемой стереоскопической модели зависит не только от свойств исходных стереоснимков, но и от зрительной системы человека и условий рассматривания снимков.

Принято считать, что главным видом изменения пространственной формы плановой модели, её анаформированности является т.н. *вертикальная деформация* Δ_v . В стереофотограмметрии вертикальную деформацию Δ_v стереомодели принято представлять как

$$\Delta_v = \frac{1}{M_v} : \frac{1}{M_r},$$

где $\frac{1}{M_v}$ — масштаб стереоскопической модели по вертикали; $\frac{1}{M_r}$ — масштаб модели в плоскости снимка (в плане, по горизонтали).

Для плановой аэрофотосъёмки при продольном перекрытии 60% снимков формата 18×18 см вертикальная деформация приближённо равна

$$\Delta_v \approx \frac{d_o}{f_c},$$

где d_o — расстояние наилучшего зрения (25 см); f_c — фокусное расстояние съёмочной системы.

В общем случае известно, что для восприятия недеформированной стереоскопической модели отношение глазного базиса b_r к расстоянию до наблюдаемой стереомодели L_M (в ряде публикаций за величину L_M принимают расстояние от глаз наблюдателя до рассматриваемых снимков) должно соответствовать отношению съёмочного базиса B к высоте съёмки H . Ещё при традиционной аэрофотосъёмке была установлена зависимость

$$\Delta_v = \frac{K}{k},$$

где $K = \frac{B}{H}$ — показатель съёмки, характеризующий угол засечки определяемых точек; k — аналогичный показатель для зрения.

При наблюдении цифровых стереоснимков на экране компьютера показатель зрения можно принять равным

$$k = \frac{b_r}{L_M} \approx \frac{65 \text{ мм}}{650 \text{ мм}} = 0,1.$$

Тогда воспринимаемая стереомодель, сформированная по космическим сканерным снимкам сверхвысокого разрешения, полученным по схеме «вперёд-в надир-назад» с высоты $H=B$ или $H=2B$, будет равномерно преувеличена по высоте соответственно в 10 и 5 раз. Естественно, что исполнитель, дешифрируя, например, микрорельеф по такой стереомодели, воспримет его более отчётливо, чем

находясь на местности. Таким образом, стереомодель, сформированная по современным космическим снимкам, полученным длиннофокусной зеркальной съёмочной системой, принципиально обладает такими же свойствами, что и стереомодель, сформированная по самолётным снимкам, полученным аэрофотоаппаратом с короткофокусным линзовым объективом. Это ценное свойство стереоскопической модели было известно ещё в 30-е годы прошлого века, когда у нас в стране началось создание карты масштаба 1:100 000. «То, что не мог увидеть в натуре глаз топографа, подсказывало стереоскопическое изображение по аэрофотоснимкам» [4]. Обратим внимание на то, что при дешифрировании под стереоскопом или невооружёнными глазами твёрдых копий тех же снимков расчётная величина вертикальной деформации воспринимаемой стереомодели окажется в 2–3 раза меньше, чем на экране компьютера, поскольку в этом случае L_m принимают равным d_o , т.е. 25 см.

«Случайная» стереомодель. Последнее десятилетие ознаменовалось запуском спутников сверхвысокого разрешения, способных выполнять съёмку с отклонением оптической оси от надира и реализующих стереосъёмку. Однако архив получаемых сейчас стереоснимков не ограничивается материалами таких специально проведенных стереосъёмок. Выполнение заказов на съёмку объектов, находящихся вне трассы спутника, необходимость повторения съёмки для решения задач мониторинга приводят к тому, что на одну и ту же территорию получают снимки с разных орбит, с различными параметрами съёмки, которые нередко также могут быть использованы как стереопары снимков. Имеются попытки автоматизированной измерительной обработки таких снимков, например, полученных с космического аппарата Каноус-В [5]. В наших исследованиях удалось использовать такие стереоснимки, названные нами «случайными» [6], для географического дешифрирования районов с малыми амплитудами рельефа — дюнных ландшафтов Анапской пересыпи. Эта аккумулятивная форма берегового рельефа на северо-восточном побережье Чёрного моря представляет один из немногочисленных районов песчаных черноморских пляжей, облада-

ющий уникальными рекреационными и бальнеологическими ресурсами. Анапские пляжи подвергаются сильнейшему антропогенному воздействию и истощению, нуждаются в мониторинге их состояния, необходимому для разработки мер по их охране и защите. Начальный шаг такого мониторинга — крупномасштабное картографирование ландшафтно-морфологической структуры пересыпи. Оно выполняется на основе дешифрирования космических снимков субметрового разрешения со спутника WorldView-2, по которым составлены карты отдельных участков пересыпи [7].

Дюнный рельеф пересыпи отличается небольшими высотами и амплитудами. Над плоской поверхностью пляжа слабо возвышаются закрепленные кустами полыни низкие дюны, которые находятся в начальной стадии формирования; они поднимаются на 1 м при амплитудах рельефа до 0,7 м. Эти формы выделяются на снимках благодаря теням от бугров и кустов полыни и образуемой ими пятнистой структуре изображения. Над пляжем на высоту 2–4, до 5 м поднимаются дюнные гряды, имеющие плосковершинные гребни, и если экспозиционные различия растительности на них не выражены, эти гребни на снимках не выделяются.

Снимки со спутника WorldView-2, служившие источником для крупномасштабного картографирования ландшафтно-морфологической структуры пересыпи, сделаны с высоты 770 км, имеют охват 16 км и разрешение 0,5 м в панхроматическом диапазоне и 2 м в многозональном варианте. Для учета сезонных изменений ландшафта съёмка была выполнена дважды: 11 августа и 13 сентября 2011 г. Снимки сделаны при разных направлениях оптической оси, с разными углами отклонения ее от надира; угол засечки идентичных точек местности составляет около 16° . Это обеспечило формирование стереомодели и восприятие исследуемых малых по высоте (до 5 м) форм рельефа. Для их дешифрирования оптимален масштаб 1:2 000, обеспечивающий стереонаблюдение рельефа с перепадами высот в первые метры. Стереопара из фрагментов снимков представлена на рис. 1.

При наблюдении принтерных отпечатков «случайных» стереопар снимков под стереоскопом, воспринимаются не только гребни

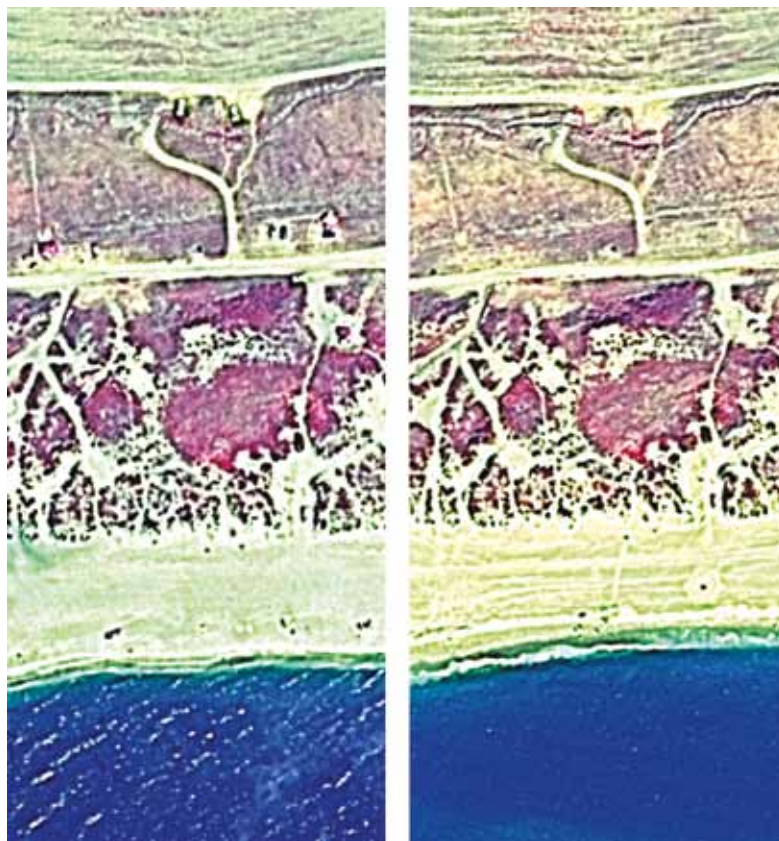


Рис. 1. Фрагмент «случайной» стереопары снимков участка Анапской пересыпи для наблюдения невооруженным глазом (снимки со спутника WorldView-2 11 августа и 13 сентября 2011 г.)

дюнных гряд высотой до 5 м, но и невысокие (2–3 м) плосковершинные дюнные валы и очень слабовыраженные ложбины между параллельными валами, когда изменения высоты составляют всего 1–2 м.

Использование для формирования стереомодели разновременных снимков связано с риском получить неконгруэнтные изображения, когда изменения на местности за период между съемками препятствуют формированию стереомодели. Как показал наш опыт, этого бояться не следует. В большинстве случаев мы имеем дело с сезонными изменениями растительного покрова. Небольшие изменения в состоянии растительности от августа к сентябрю — разная цветовая гамма стереопарных снимков и некоторая тоновая неконгруэнтность изображений — не помешали стереовосприятию. Для глаза оказалось достаточным некоторого количества изобразившихся на обоих снимках стереообразующих деталей, обеспечивших формирование стереомодели. В нашем случае в качестве таких деталей выступали черные

пятна кочек полыни с тенями от них, положение которых сохраняется длительное время. В то же время отсутствие таких стабильных деталей препятствует восприятию стереоизображения, как это видно на приведенной на рис. 1 стереопаре для района песчаного пляжа, так же как и сильные различия в изображении, что проявилось на морской поверхности.

Полевое дешифрирование дюнного рельефа Анапской пересыпи выполнялось по одиночным снимкам, без использования стереопар снимков и наблюдения стереомодели. При дешифрировании структурных линий рельефа в поясе дюнных гряд, где изменение углов наклона и экспозиции склонов сопровождается изменением проективного покрытия растительности, мы опирались на эти косвенные признаки, и гребни дюн выделялись по границам смены разреженной растительности на наветренных склонах дюн более густыми зарослями растительности подветренных склонов. В тех же случаях, когда склоны были слишком пологими, а широкие гребни дюн

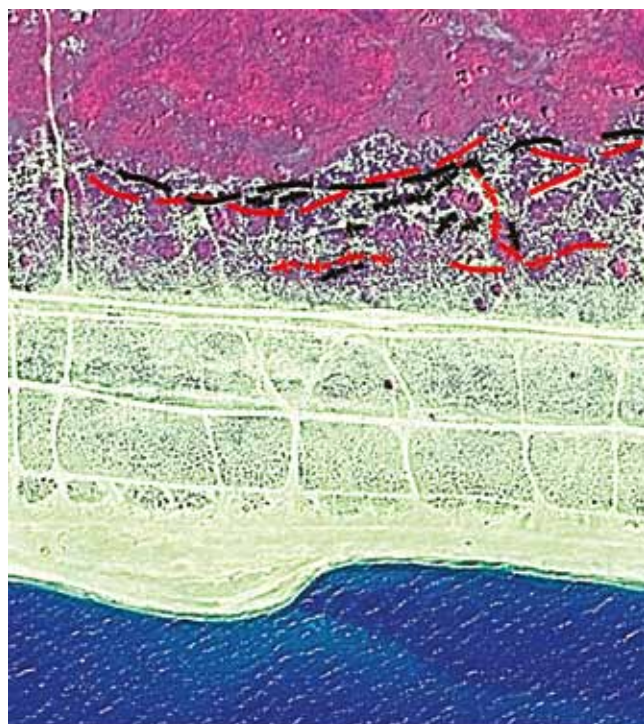


Рис. 2. Положение гребней дюнных валов по результатам полевого дешифрирования одиночных снимков (1) и стереоскопического дешифрирования снимков с двух орбит спутника WorldView-2 (2):
а — четко выраженные гребни; б — нечетко выраженные гребни

плосковершинными — эти косвенные признаки экспозиционного изменения растительности не работали. В таких случаях приходилось судить о положении гребня по расстоянию до опознаваемых на снимке объектов — отдельных деревьев, кустов — или опираться даже на такие ненадежные признаки, как длина тени вдоль врезанных в грунт песчаных дорожек, пересекающих дюны, которая увеличивается на гребнях дюн.

Переход к использованию «случайных» стереопар снимков и к дешифрированию дюнного рельефа при стереоскопическом наблюдении изменил ситуацию. Благодаря некоторому преувеличению модели по высоте и возможности целостного восприятия форм рельефа совместно с окружением, структурные линии рельефа определялись достаточно уверенно даже в случае пологих склонов, плосковершинных гребней и слабо врезанных ложбин. Рис. 2,

на котором приведены результаты нанесения структурных линий на снимок при полевом дешифрировании и исправление их положения в результате стереоскопического дешифрирования, показывает, что такое уточнение было весьма существенным.

Таким образом, для стереоскопического географического дешифрирования с успехом могут использоваться «случайные» стереопары космических снимков, полученные не в результате специальной стереосъемки, а при повторении съемки одного и того же участка местности. Необходимое условие для образования таких стереопар — съемка одного и того же участка местности с разных точек пространства как с одной орбиты (при разном продольном отклонении оптической оси от надира), так и с разных орбит (при разном поперечном отклонении оптической оси от надира, что обычно выполняется в случае прицельной съемки). Другое необходимое условие — идентичность масштаба снимков, который не должен различаться более чем на 10%; в связи с этим в случае использования разномасштабных снимков необходимо приведение их к одинаковому или близкому масштабу. Желательно иметь снимки одинакового или близкого пространственного разрешения, обеспечивающего выделение на снимках одних и тех же стереообразующих деталей. Важным условием является также конгруэнтность (подобие) изображения; неконгруэнтность даже на отдельных участках обуславливает локальное разрушение стереомодели. Большая часть этих условий наилучшим образом обеспечивается при использовании разновременных снимков, получаемых с помощью одной и той же съемочной системы. Успешный опыт применения таких снимков со спутника WorldView-2 для картографирования дюнного рельефа Анапской пересыпи свидетельствует о целесообразности обращения к «случайным» стереопарам космических снимков при различных видах их географического дешифрирования.

Заключение. В недалёком прошлом наиболее существенные достижения в развитии аэрометодов определялись потребностями топографического картографирования, которое стимулировало, прежде всего, фотограмметрические исследования. Однако при

дешифрировании снимков, в отличие от фотограмметрических измерений, требуется более разностороннее знание свойств стереоскопической модели. В статье затронуты лишь два таких вопроса — о вертикальной деформации стереоскопической модели и о возможностях дешифрирования т.н. «случайных» стереоскопических снимков. На наш взгляд, необходима дальнейшая разработка проблемы по нескольким направлениям, из которых отметим только некоторые.

1. Требуется оценить минимальную насыщенность сопряжённых снимков стереообразующими деталями, которых должно быть достаточно для формирования стереомодели, предназначенной для дешифрирования.

2. При исследовании изменений изучаемых объектов приходится образовывать стереоскопические модели из разновременных снимков, изображения которых, строго говоря, неконгруэнтны. Проблема неконгруэнтности возникает и при квантовании и сжатии—восстановлении цифровых снимков. Всё это требует изучения явления конгруэнтности и оценки его влияния на качество стереоскопической модели.

3. Третье направление предусматривает теоретико-методологические разработки в области стереоскопического моделирования. Здесь прежде всего требуется его философское осмысление как научного моделирования. Разработки по этому направлению должны

тесно взаимодействовать с проблемами стереоскопического зрения человека, опираясь на учение В.И. Вернадского о ноосфере, т. е. речь идёт о бионическом подходе в стереомоделировании.

Движение по трём намеченным направлениям ведёт к созданию основ цельного учения о стереоскопической модели, которое должно включать разделы как о её фотограмметрических измерениях, так и о дешифрировании.

Работа выполнена по гранту РФФИ 13-05-00057 и Программе поддержки ведущих научных школ РФ НШ-22.48.2014.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скиридов А.С. Стереофотограмметрия: учебник. М.: Геодезиздат, 1959. — 540 с.
2. Лобанов А.Н. Аэрофототопография. М.: Недра, 1978. — 575 с.
3. Книжников Ю.Ф. Основы стереоскопического геомоделирования. М.: Научный мир, 2013. — 196 с.
4. Пандул И.С. Записки старого топографа // Геодезия и картография. — 2014. — №1. — С.42–47.
5. Пеишун А.А. Построение стереопар с использованием данных с космического аппарата «Канопус-В» / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Тезисы докладов 11 Всероссийской конференции на CD ROM.
6. Кравцова В.И., Чалова Е.Р. Возможности дешифрирования «случайных» стереопар космических снимков сверхвысокого разрешения (на примере дюнного рельефа Анапской пересыпи) // Геодезия и картография. — 2014. — № 9. — С. 34–40.
7. Кравцова В.И. Изучение и картографирование ландшафтно-морфологической структуры Анапской пересыпи по космическим снимкам высокого разрешения // Геодезия и картография. — 2013. — №12. — С.11–20.

Принята к печати 26 июня 2014 г.

УДК 528.9

КАРТОГРАФИЯ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ МЕРКУРИЯ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОЙ АЛЬТИМЕТРИИ МИССИИ МЕССЕНДЖЕР

Кандидат физ.-мат. наук **М.А. Креславский**^{1,2}, аспирант **А.А. Коханов**¹,
кандидат техн. наук **И.П. Карачевцева**¹

¹Московский государственный университет геодезии и картографии

²Университет Калифорнии – Санта Круз, Санта Круз, США

I_karachevtseva@miigaik.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетов и картографирования статистических параметров рельефа северного полушария Меркурия. Карты топографической шероховатости, вычисленной на разных базисах, созданы по новейшим данным лазерного альтиметра MLA, находящегося на орбите вокруг Меркурия с марта 2011 г. на борту космического аппарата (КА) Мессенджер. Хотя из-за большого эксцентриситета орбиты КА данные альтиметра доступны только для северной приполярной области планеты, они обеспечивают возможность нового взгляда на особенности рельефа Меркурия. Полученные предварительные результаты позволяют выявить четкие различия между относительно гладкими равнинами и шероховатыми областями северного полушария Меркурия, а также выполнить сравнение со статистическими параметрами рельефа Луны.

Ключевые слова: Меркурий, топографическая шероховатость, лазерный альтиметр MLA, планетная картография

Abstract. The paper presents the results of calculation and mapping of statistical parameters of topography of the northern hemisphere of Mercury. Topographic roughness maps at different baselines were created with the latest data acquired by Mercury Laser Altimeter (MLA) orbiting Mercury since March 2011 onboard MESSENGER mission. Although because of a high eccentricity of the spacecraft orbit the altimeter data are available for the northern polar regions of the planet only, they provide a new look at the features of topography of Mercury. The obtained preliminary results indicate a clear distinction between relatively smooth plains and rough areas of the northern hemisphere of Mercury; they also enable a comparison with statistical characteristics of topography of the Moon.

Keywords: Mercury, topographic roughness, Mercury Laser Altimeter (MLA), planetary cartography

Введение. Шероховатость или расчлененность рельефа порой отражает больше информации, чем может быть показано на топографических картах и космических изображениях поверхности. Статистические методы анализа рельефа позволяют использовать эту информацию для геоморфологического изучения планет Солнечной системы.

Наиболее яркий пример такого рода дают данные планетных орбитальных лазерных альтиметров. Эти приборы, как правило, имеют исключительно высокую внутреннюю точность определения расстояния от орбитального аппарата до поверхности планеты, в то

время как абсолютная точность определения высот определяется точностью знания орбиты аппарата, которая, как правило, существенно ниже, чем точность определения расстояния до поверхности. Правильно подобранные статистические характеристики, характеризующие топографическую шероховатость, вогнутость/выпуклость, ориентационную асимметрию и т.п., помогают использовать высокую точность измерений для изучения свойств поверхности тел, независимо от погрешностей определения положения орбиты КА.

Как правило, для планетных лазерных альтиметров горизонтальное расстояние вдоль

орбит между последовательными замерами высот меньше, чем типичное расстояние между орбитами. В результате пространственное разрешение топографических данных вдоль орбит обычно много выше, чем пространственное разрешение топографических карт, построенных по этим данным. Применение статистических методов позволяет использовать дополнительную информацию, связанную с высоким разрешением вдоль орбит, которая не отражена на топографических картах.

Так, первые глобальные карты шероховатости планет земной группы были построены для Марса по данным альтиметра MOLA на борту КА Mars Global Surveyor [1, 2], и для Луны по данным альтиметра LOLA на борту КА Lunar Reconnaissance Orbiter (КА LRO) [3–5]. Карта шероховатости Луны позволила, например, установить, что выбросы крупного ударного лунного бассейна Море Восточное имеют уникальные характеристики, отличные от прочих ударных бассейнов подобного размера [5]. Гравильно подобранные статистические характеристики обеспечивают эффективное использование высокого пространственного разрешения данных вдоль орбиты КА.

Расчеты шероховатости поверхности Меркурия по данным лазерного альтиметра MLA. Методы вычисления топографической шероховатости Меркурия, используемые в настоящем исследовании, аналогичны методике расчетов шероховатости поверхности Луны, выполненные по данным лазерного альтиметра LOLA [5]. В данной работе использовались высотные профили, полученные лазерным альтиметром MLA на борту КА Мессенджер в период с марта 2011 г. по сентябрь 2013 г. [6]. На время начала наших исследований количество измерений лазерного высотомера КА Мессенджер составляет всего 1% уже имеющихся данных по Луне, полученных лазерным альтиметром LOLA, установленного на борту КА LRO [7]. Кроме того, из-за большого эксцентриситета орбиты КА Мессенджер его альтиметр обеспечивает измерения только северного полушария планеты. При этом на низких широтах и на северном полюсе расстояние между профилями довольно велико, что не позволяет в этих местах достигнуть разрешения, сравнимого с данными лазерной альтиметрии

Луны. Поэтому созданные карты шероховатости Меркурия имеют приемлемое для задач настоящего исследования разрешение фактически только для северной приполярной области, ограниченной 65° с.ш. и 84° с.ш.

Топографическая шероховатость зависит от характерного пространственного размера форм рельефа. Чтобы охарактеризовать эту зависимость, вычисления шероховатости выполнены на нескольких разных базисах L . Выбор длины базисов основан на типичном расстоянии между соседними отсчетами вдоль профиля высотомера, которое для MLA составляет около 0,35 км. Как показано ниже, минимальное количество измерений, используемое для вычислений, составляют три последовательных отсчета вдоль орбиты, поэтому кратчайшим возможным базисом для расчетов меры шероховатости является удвоенное типичное расстояние между отсчетами: $L_1 = 2 \times 0,35 \text{ км} = 0,7 \text{ км}$. Размеры других базисов предложены по аналогии с расчетами шероховатости Марса [2] и Луны [5], как величины в 4 и 16 раз больше, чем самый короткий базис, что соответствует следующим их значениям: $L_2 = 2,8 \text{ км}$ и $L_3 = 11,2 \text{ км}$.

Количественная мера шероховатости поверхности вычислялась при помощи следующего алгоритма. Для каждого отсчета альтиметра рассчитывался параметр кривизны C топографического профиля вдоль проекции орбиты по формуле

$$C = (h_+ + h_- - 2h) / (l_+ + l_-)^2, \quad (1)$$

где h — это данный отсчет высоты; h_+ и h_- — высоты для отсчетов, находящихся на расстоянии примерно $\frac{1}{2}$ длины базиса вперед и назад вдоль профиля; l_+ и l_- — горизонтальные расстояния от данного отсчета h до выбранных отсчетов h_+ и h_- , соответственно, откуда следует, что $l_+ + l_- \approx L$.

Из-за вытянутости орбиты КА Мессенджер расстояния между соседними отсчетами не всегда постоянны, как это было в случае данных LOLA и MOLA. Для самого короткого базиса $L_1 = 0,7 \text{ км}$ всегда использовались три последовательных отсчета вдоль орбиты. При расчетах для длинных базисов (L_2 и L_3), в отличие от данных LOLA и MOLA, в качестве отсчетов h_+ и h_- не всегда использовались 4-й или 16-й отсчеты вдоль профиля, а выбирались

такие, чтобы расстояния до них оказывались ближе всего к половине номинального базиса $L_2/2$ и $L_3/2$. При этом количественно близость расстояний к $L/2$ проверялась при помощи следующих неравенств:

$$0,35L \leq l_-; l_+ \leq 0,7L. \quad (2)$$

Кроме того, если расстояния l_+ и l_- отличались друг от друга более чем на 10%, такие отсчеты исключались. Разумеется, все исходные данные, отмеченные как неудовлетворительные, были исключены. С учетом всех этих ограничений получено $\sim 4 \cdot 10^6$ значений кривизны C для минимального базиса L_1 , а также $\sim 7 \cdot 10^6$ отсчетов для каждого из других базисов L_2 и L_3 .

В результате выполненных расчетов пространственные распределения топографической шероховатости для разных базисов получены в виде трех матриц с размером пикселя $\sim 2,7$ км

(16 пикселей на градус). С целью минимизации искажений для отображения данных в северной приполярной области Меркурия использовалась равновеликая азимутальная проекция (проекция Ламберта). Для каждого пикселя топографическая шероховатость вычислялась следующим образом. Из всего набора кривизн C были выбраны те, которые находятся внутри круга определенного радиуса R с центром в центре данного пикселя. Для базисов L_1 и L_2 использованы два различных радиуса R для разных широтных зон: радиус $R_{1,2} = 1,9$ км (равный $1/2$ диагонали пикселя размером 2,7 км) для зоны 70° – 84° с.ш. и $R_{1,2} = 3,8$ км для 65° – 70° с.ш., где плотность данных существенно ниже. Для базиса $L_3 = 11,2$ км использован общий радиус $R_3 = 3,8$ км в пределах всей исследуемой территории. Для пикселей, в пределах которых получено менее 20-ти вычисленных значений кривизны C , выставлялось значение «нет данных». Для пикселей с 20-ю и более значениями C определены квартили распределения значений кривизны $C_{1/4}$ и $C_{3/4}$. Межквартильный размах $r = C_{3/4} - C_{1/4}$ как мера ширины этого распределения и был использован в качестве меры степени топографической шероховатости. Детальное обоснование и обсуждение выбора данного статистического параметра как меры шероховатости поверхности представлено в работах [5, 8].

Пиксели, в которых нет данных, составляют около 15% общего их числа в широтной зоне, ограниченной 65° с.ш. и 84° с.ш., преимущественно в районах низких широт. Отсутствующие значения в этих пикселях заполнены с помощью следующего эвристического алгоритма. Рассматривался набор круговых окрестностей пикселя, начиная с самой маленькой (8 соседних пикселей). Если в окрестности оказывались в наличии пиксели с информацией, то в данный пиксель записывалась медиана всего информационного массива окрестности. Если же для всех пикселей окрестности данные отсутствовали, то рассматривалась окрестность большего размера, и т.д. до некоторого предела (круг радиуса 5 пикселей). Такой алгоритм не производит артефактов и лучше всего сохраняет визуальную резкость полученных пространственных распределений шероховатости при отображении.

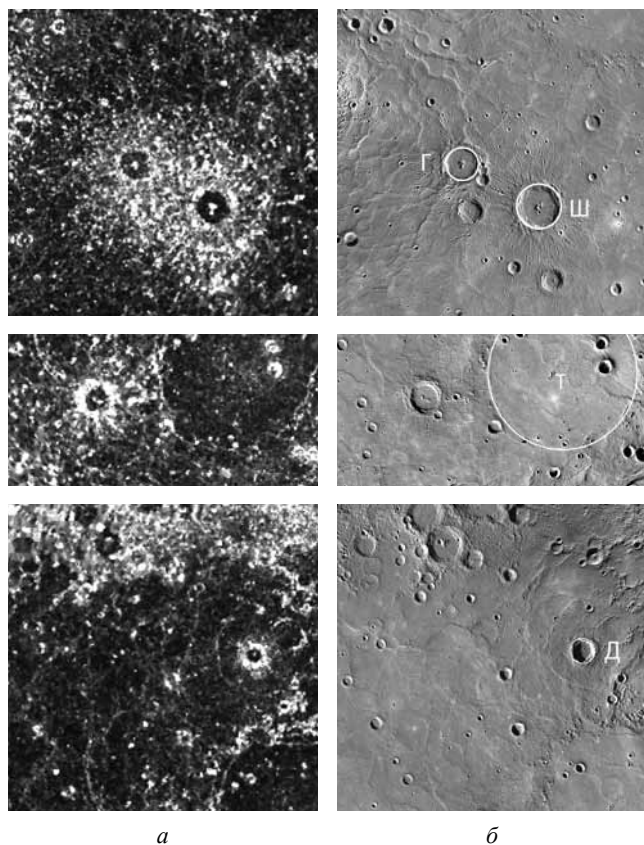


Рис. 1. Примеры отображения типичных форм рельефа на основе топографической шероховатости (а), по сравнению с космическими изображениями поверхности Меркурия (б), на которых буквами обозначены названия кратеров:

Ш — Штиглиц; Г — Гауди; Т — Геге; Д — Деспре

Картографирование топографической шероховатости Меркурия. Успешное использование результатов вычислений параметров шероховатости во многом определяется удачным выбором их визуального представления. Результаты статистической обработки могут быть отображены разным способом —

с помощью черно-белых (рис. 1) или цветных изображений (рис. 2). Например, при изучении специфических черт объектов, видимых на космических снимках поверхности планет, наиболее удобным оказывается применение серой шкалы (рис. 1, а), поскольку это позволяет лучше оценить основные геологические

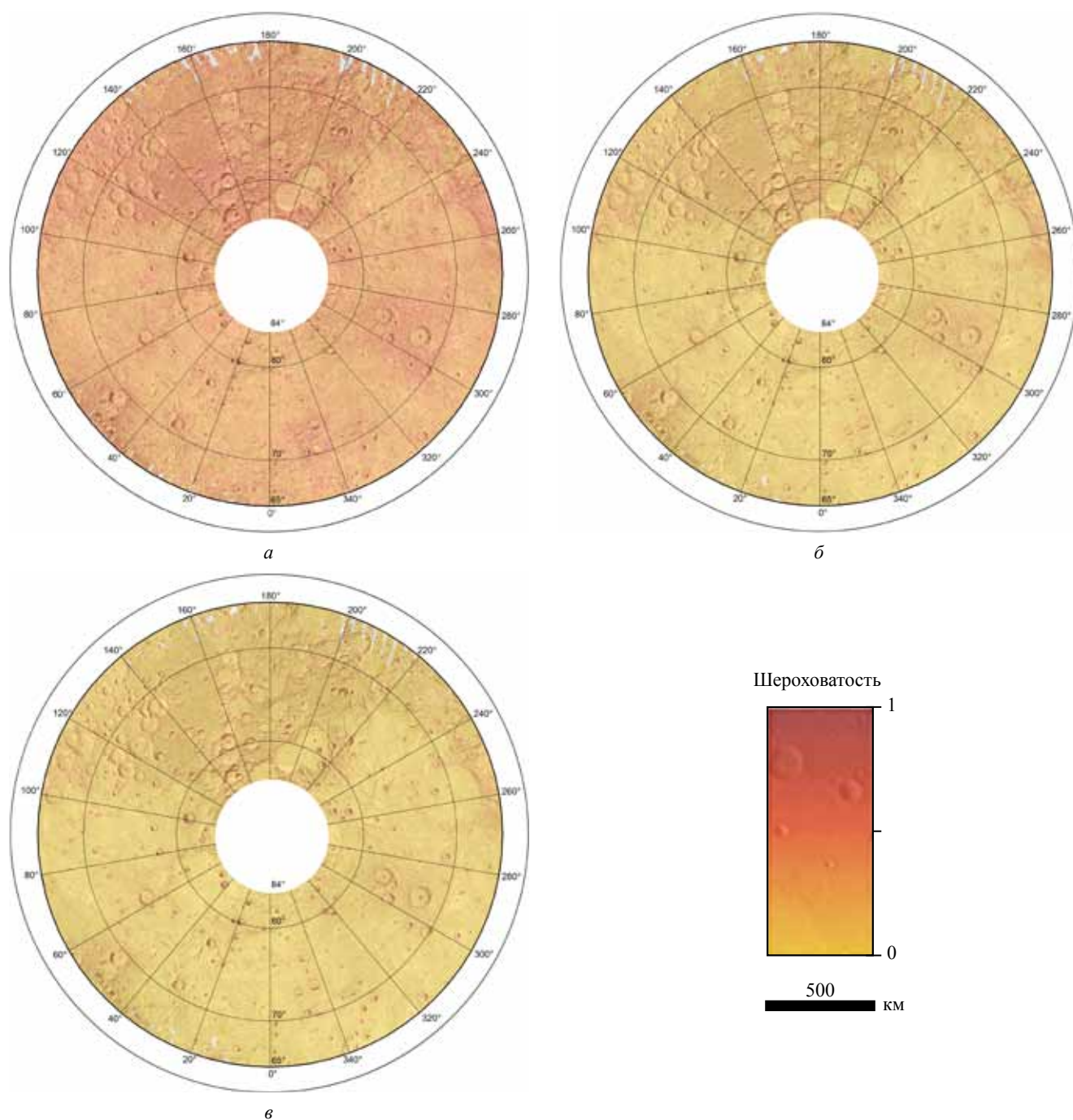


Рис. 2. Шероховатость северного полушария Меркурия, полученная по данным MLA на основе вычислений с разными базисами:

а — 0,7 км; б — 2,8 км; в — 11,2 км

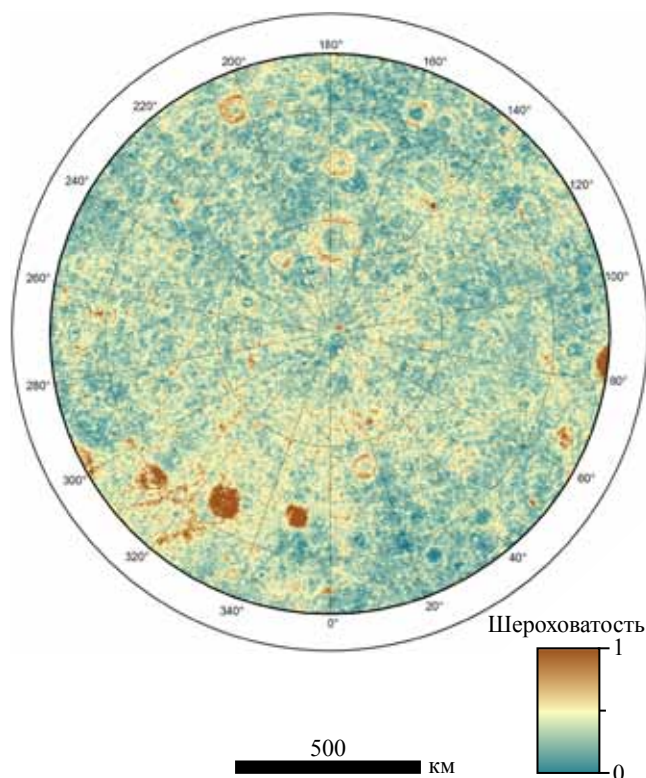


Рис. 3. Шероховатость северного полушария Луны, полученная по данным LOLA на основе вычислений с базисом 0,48 км

параметры и форму объектов: светлые области отражают шероховатые территории, тогда как темные показывают более гладкие районы.

Для оценки полученных параметров в сравнительно-планетологическом аспекте была выбрана Луна; при этом расчеты мер шероховатости V_i в каждой ячейке растровых изображений, полученных из обработки данных лазерной альтиметрии Меркурия (MLA) и Луны (LOLA), были нормализованы по формуле

$$V_{\text{норм}} = (V_i - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}). \quad (3)$$

В результате для каждой i -й ячейки растровых изображений шероховатости получены значения, изменяющиеся от 0 до 1 (рис. 2, 3), что соответствует изменению от самой гладкой до наиболее шероховатой поверхности.

Очевидная деталь на цветных изображениях топографической шероховатости северного полушария Меркурия (рис. 2) — различие между гладкими равнинами и кратерированными областями, что хорошо проявляется для меры шероховатости, вычисленной на длинных базисах (см. рис. 2, б, в). При этом видно, что изменения шероховатости поверхности в

пределах северных равнин гораздо меньше, чем различия меры шероховатости между равнинами и кратерированными областями.

Особенности шероховатости Меркурия, проявляющиеся на длинных базисах, аналогичны различиям меры шероховатости между морскими и материковыми поверхностями на Луне. При этом количественно степень шероховатости кратерированных областей Меркурия существенно ниже, чем шероховатость лунных материков, вычисленная согласно описанной выше методике, с использованием данных лазерного альтиметра LOLA на борту КА LRO. Так, шероховатость Луны, вычисленная на базисе 0,48 км [5] показывает резкие контрасты между материковыми и морскими зонами (см. рис. 3), что сходным образом проявляется для расчетов шероховатости Меркурия на базисе 2,8 км (см рис. 2, б). Поэтому для сравнительно-планетологического представления глобальных пространственных распределений топографической шероховатости, рассчитанных по данным лазерной альтиметрии для исследуемых тел земной группы, выбраны значения шероховатости, полученные для этих базисов.

На макете карт приполярных областей Луны и Меркурия (рис. 4) хорошо заметно сходство общего характера статистических параметров небесных тел и вышеупомянутый контраст между гладкими и шероховатыми областями. Приполярные территории Луны и Меркурия представлены в косой ортографической проекции с центром 75° с.ш. и 0° в.д. Из-за особенностей орбиты, описанных выше, и ограниченного количества исходных данных MLA, исследованная область Меркурия пока невелика, поэтому для заполнения территории с отсутствующими данными использована глобальная мозаика [9], полученная на основе широкоугольной камеры КА Мессенджер MDIS (The Mercury Dual Imaging System) [10].

Оцифровка долгот для карты Луны, согласно рекомендациям Международного астрономического союза [9], выполнена от 0 до 360° в восточном направлении, для карты Меркурия — в западном. Указанный на макете (для печатного листа размером A0) масштаб отображения Луны примерно в 1,4 крупнее, что отражает соответствующую разницу в размерах тел (радиус Меркурия — 2439 км, радиус Луны — 1738 км).

Заключение. Представленные результаты являются продолжением работ авторов по кар-

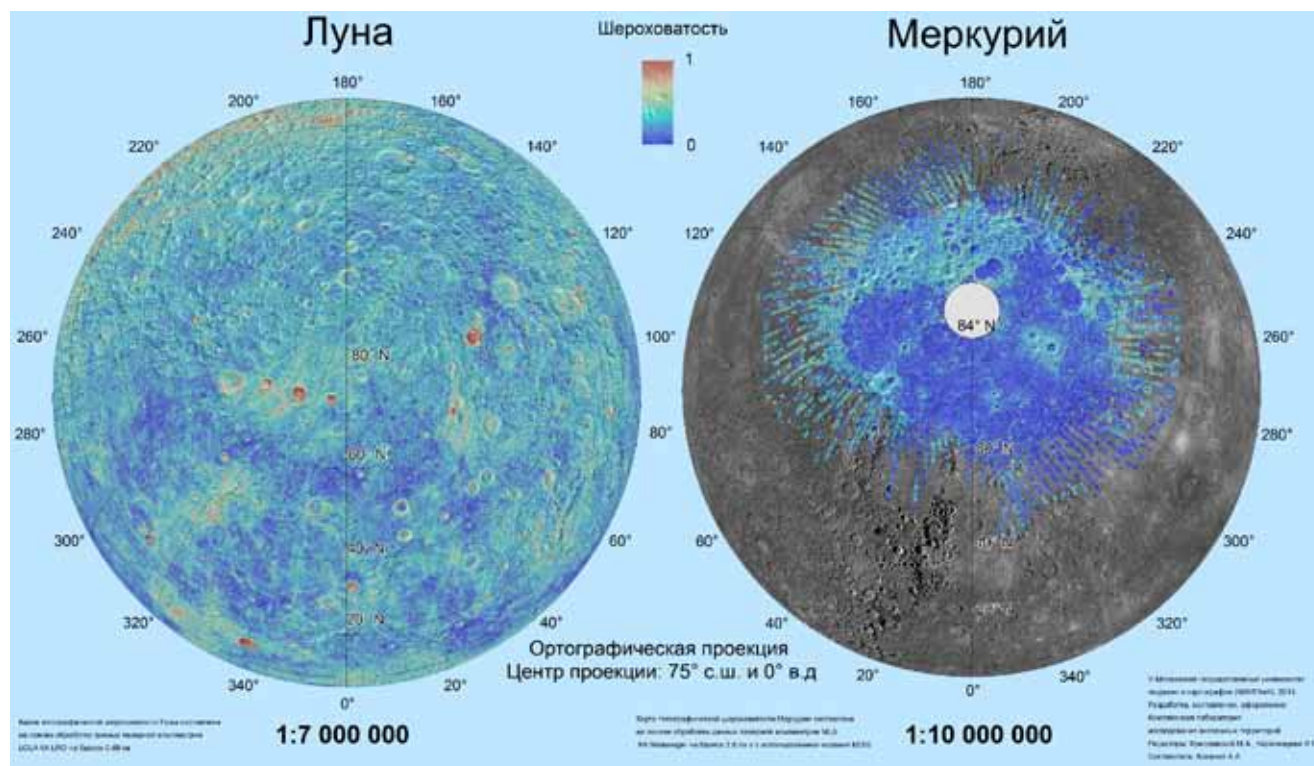


Рис. 4. Макет карт топографической шероховатости Луны и Меркурия

тографированию топографической шероховатости планет и спутников земной группы [8, 12]. Созданные карты позволяют не только выявить типичные геологические особенности, но и выполнить сравнительно-планетологический анализ поверхности небесных тел, что является важнейшим аспектом применения картографических методов в планетных исследованиях.

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАИК) при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-22-00197.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kreslavsky, M.A., Head, J.W. Kilometer-scale roughness of Mars: Results from MOLA data analysis. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105, 26695-26712.
2. Kreslavsky, M.A., Head, J.W. Mars: Nature and evolution of young latitude-dependent water-ice-rich mantle. *Geophys. Res. Lett.* 2002. 29, 1719, DOI 10.1029/2002GL015392
3. Rosenburg, M.A., Aharonson, O., Head, J.W., Kreslavsky, M.A., Mazarico, E., Neumann, G.A., Smith, D.E., Torrence, M.H., Zuber, M.T. Global surface slopes and roughness of the Moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter. *J. Geophys. Res.* 2011. 116, 2001.
4. Kreslavsky, M.A., Head, J.W. New observational evidence of global seismic effects of basin-forming impacts on the Moon from Lunar Reconnaissance Orbiter Lunar Orbiter Laser Altimeter data. *J. Geophys. Res.* 2012. 117, E00H24.
5. Kreslavsky, M.A., J.W. Head, G.A. Neumann, M.A. Rosenburg, O. Aharonson, D.E. Smith, and M.T. Zuber. Lunar topographic roughness maps from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Scale dependence and correlation with geologic features and units. *Icarus*, 2013, 226, 52-66.
6. PDS Geoscience Node. URL: http://pds-geosciences.wustl.edu/messenger/mess-e_v_h-mla-3_4-cdr_rdr-data-v1/ (дата обращения 02.09.2014)
7. Smith D.E. and 30 colleagues. The Lunar Orbiter Laser Altimeter Investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission. *Space Sci. Rev.*, 2010, № 150, 209-241.
8. Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П., Матвеев Е.В. Картографирование топографической расчлененности поверхности Луны на основе глобальной цифровой модели рельефа GLD100 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса ИКИ РАН, 2013, Т.10, № 4. С. 136 - 153. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t4/136-153.pdf
9. Astrogeology Science Center. URL: http://astrogeology.usgs.gov/search/details/Mercury/Messenger/Global/Mercury_MESSENGER_MDIS_ClrMosaic_global_665m_v3/cub (дата обращения 02.09.2014)
10. Mercury Dual Imaging System (MDIS) // Messenger. URL: <http://www.messenger-education.org/instruments/mdis.php/> (дата обращения 02.09.2014)
11. Archinal, B. A., A'Hearn, M.F., Bowell, E., Conrad, A., Consolmagno, G.J., Courtin, R., Fukushima, T., Hestroffer, D., Hilton, J.L., Krasinsky, G.A., Neumann, G., Oberst, J., Seidelmann, P.K., Stooke, P., Tholen, D.J., Thomas, P.C., Williams, I.P. 2011, Report of the IAU working group on cartographic coordinates and rotational elements: 2009. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 109, 101-135.
12. Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П. Создание глобальной карты параметров рельефа Луны по современным данным дистанционного зондирования КА LRO // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», -2014. -№ 5. -С. 38-42.

Принята к печати 3 ноября 2014 г.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА КАРТ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО АТЛАСА САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Ст. преподаватель **А.А. Верхотуров**
Сахалинский государственный университет
ussr-91@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены и обоснованно выбраны элементы математической основы, которые необходимо учитывать при построении комплексного геоэкологического атласа в современной геоинформационной среде.

Ключевые слова: математическая основа карт, референц-эллипсоид, геоэкологический атлас, масштаб, генерализация, картографическая проекция, датум

Abstract. Elements of mathematical base necessarily considered for construction of complex geoeological atlas in modern geographic information systems are reasonably selected.

Keywords: mathematical basis of map, reference ellipsoid, geoeological atlas, scale, generalization, map projection, datum

Любой атлас — это систематическое собрание карт, выполненное по единой программе как целостное произведение и изданное в виде книги или комплекта листов. Это не просто набор карт под общим переплетом, но система взаимоувязанных и взаимодополняющих друг друга карт [1, 2].

Электронные ГИС-атласы принципиально не отличаются от традиционных бумажных изданий. Более того, ГИС-атлас изначально обладает внутренним единством, системностью и передает информацию в единообразном виде, так как тематические карты представлены в нем в виде слоев, наложенных на единую картографическую основу.

Комплексный атлас — это всегда набор тематических карт, а создание любой карты начинается с формирования математической основы, которая позволяет увязать местоположение точек на местности и в виртуальном картографическом пространстве.

Специалисты, работающие с профессиональными ГИС-пакетами в России, наиболее широко применяют два программных продукта: MapINFO и ArcGIS [3]. В качестве программной среды для создания атласа Сахалинской области нами был выбран наиболее популярный продукт американской фирмы ESRI — ArcGIS, который позволяет настроить параметры математического каркаса для картографирования.

Фигуру, ограниченную уровнем поверхности вод мирового океана немецкий физик И.Б. Листиг назвал геоидом. Наиболее приближена к реальной форме Земли (геоиду) геометрическая фигура — эллипсоид вращения.

В разное время и в разных странах были приняты и законодательно закреплены различные эллипсоиды, параметры которых не совпадают между собой. Так в Германии используется эллипсоид Бесселя, в Великобритании — Кларка, в США — Хейфорда. В 1984 г. по данным анализа спутниковых измерений был вычислен Международный эллипсоид WGS-84 (World Geodetic System) [2, 4].

В России до 1942 г. использовался эллипсоид Бесселя [4]. Наиболее точные размеры Земного эллипсоида были получены в 1940 г. группой ученых, работавших под руководством Ф.Н. Красовского [5]. Эллипсоид Красовского был принят в 1946 г. и сегодня является самым распространенным в России и на всем постсоветском пространстве.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 146 приняты новые параметры референц-эллипсоида, рекомендуемые для использования при осуществлении геодезических и картографических работ. Референц-эллипсоид с новыми параметрами получил название — геодезическая система координат ГСК-2011. Он отличается от эллипсоида Красовского длиной большой полуоси и коэффициентом сжатия [6, 2]. Этим же постановлением использование эллипсоида Красовского разрешается до 2017 г.

Сравнение параметров референц-эллипсоидов Красовского и ГСК-2011

Референц-эллипсоид	Большая полуось, м	Коэффициент сжатия
Красовского	6378245	1:298,3
ГСК-2011	6378136,5	1:298,2564151

Большинство карт, которые являются основными источниками растровых данных для построения электронных карт в комплексном геоэкологическом атласе (КГА) Сахалинской области и иных географических атласов России, построены на референц-эллипсоиде Красовского. Для удобства работы с полученными картами было бы логично использовать давно общепринятый в нашей стране эллипсоид Красовского. Тем более, что программный пакет ArcGIS обладает возможностью преобразовывать параметры референц-эллипсоида Красовского в ГКС-2011 и обратно. В противовес этому сомнительному удобству (разница в картографическом отображении на столь небольшой территории не видна) встает принятое на государственном уровне ГСК-2011, как наиболее достоверные данные о конфигурации планеты, полученные с использованием космических спутников, а также законодательное ограничение использования привычного эллипсоида.

Исходя из вышесказанного, при создании КГА приняты параметры эллипсоида ГСК-2011. При выборе эллипсоида из списка стандартных сфероидов в ArcGIS новый ГСК-2011 не обнаруживается по причине его отсутствия в базе. Поэтому необходимо самим вводить необходимые параметры сфероида вручную.

Немаловажным элементом при создании атласа является масштаб карт. Карты в атласах целесообразно строить в едином масштабе или кратных ему масштабах [2]. Поэтому для удобства пользователей при построении КГА, будут использованы четыре базовых масштаба: 1:1 000 000; 1:2 000 000; 1:4 000 000; 1:8 000 000.

Электронный атлас первоначально строится в масштабе 1:1 000 000, и лишь затем гео-данные будут подвержены генерализации для получения более мелких масштабов представления карт. Следующий этап выбора требований к картам атласа — решение вопроса о генерализации.

В ArcGIS генерализацию можно проводить двумя способами. Первый — осуществляется через свойства слоя в карте. Эту же операцию можно проводить и с группой слоев. Этим способом можно добиться того, чтобы определенный слой или группа слоев изображались исключительно в крупномас-

штабном диапазоне, и не перегружали карту в мелком масштабе.

Второй вариант генерализации — это использование атрибутивной выборки как частного, так и более упрощенного способа генерализации. Этим способом можно разгружать мелкомасштабную карту, например от коротких притоков речной сети или же от густоты изолиний на топографической карте. Набор этих масштабных рядов достаточно полно отображает информацию о составных частях экосферы на уровне островного региона.

Ещё одна причина, которая обусловила использование масштабных рядов 1:2 000 000; 1:4 000 000; 1:8 000 000 — это возможность издания в бумажном виде карт всей Сахалинской области в стандартных форматах А2, А3, А4 соответственно. Такая возможность также необходима пользователям при распечатке обзорных тематических карт. При этом необходимо учитывать, что ArcGIS никак не ограничивает пользователей применять более крупные или же более мелкие масштабы, просто это будет отражаться на качестве изображения. Карты более крупного масштаба с детализацией до административных районов области служат резервом для дальнейшего совершенствования КГА.

Перед тем как распечатывать, карту необходимо скомпоновать, то есть разместить на листе само картографическое изображение, название, легенду, диаграммы и другие компоненты. Подготовить к печати можно как в самом ArcGIS, так и экспортировав изображения в другие программы, например CorelDRAW или Photoshop.

Такой элемент математической основы, как картографическая проекция также требует особого внимания при ее выборе для конкретной отображаемой на картах территории. Проекция устанавливает соответствие между геодезическими координатами точек (широтой и долготой) и их прямоугольными координатами на карте [2].

Главная задача, которая стоит при выборе проекции карт атласа, заключается в достижении наименьшей величины искажений длин, площадей, углов и их распределения по территории. Выбранная исходная проекция не будет константой в неизменном виде. Карты атласа всегда можно перепроецировать под конкретные нужды пользователя, используя возможности ArcGIS.

Для таких регионов, как Сахалинская область, выбор проекции несколько теряет актуальность по причине того, что искажение площадей на небольших территориях практически не заметно.

В работе выбрана поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса–Крюгера, которая применяется для построения топографических карт в России (рис. 1), известна так же, как Поперечная проекция Меркатора. Эта проекция подобна проекции Меркатора, но в данном случае цилиндр разворачивается не вокруг экватора, а вокруг одного из меридианов. Результатом является равноугольная проекция, которая не сохраняет правильные направления. Центральный меридиан находится в регионе, который может быть выбран. По центральному меридиану искажения всех свойств объектов региона — минимальные. Эта проекция наиболее подходит для картографирования территорий, протяженных с севера на юг, каковым и является основной объект — остров Сахалин [7].

Основные свойства проекции:

равноугольная, у которой сохраняются малые формы, искажение формы больших территорий увеличивается при удалении от центрального меридиана;

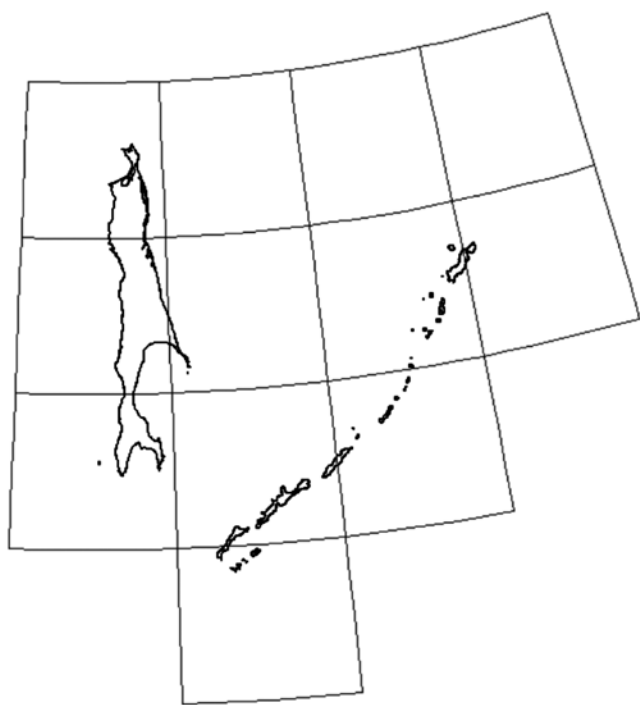


Рис. 1. Отображение береговой линии Сахалинской области в проекции Гаусса–Крюгера на эллипсоиде ГСК-2011

искажение возрастает по мере удаления от центрального меридиана;

локальные углы точны везде;

точный масштаб вдоль центрального меридиана, если масштабный коэффициент равен 1,0. Если он меньше 1,0, то точный масштаб сохраняется на прямых линиях, расположенных на равных расстояниях по обе стороны от центрального меридиана [7].

Сахалинская область находится в пределах 24 и 27 зоны (141° – 157° в.д.) проекции Гаусса–Крюгера. Так как остров Сахалин служит основным объектом картографирования, то целесообразно пропустить центральный меридиан с нулевыми искажениями по центральной части острова по 143° .

ArcGIS предусматривает всевозможные единицы измерений, но для удобства и обеспечения большей точности измерений для карт атласа за линейные единицы измерения приняты метры.

Для обеспечения наиболее точной привязки на локальном уровне используется датум. Датум (система геодезических координат) — набор параметров, используемых для смещения и трансформации референц-эллипсоида в локальные географические координаты. В геодезии и картографии это понятие используется для наилучшей аппроксимации (приближения) к геоиду в конкретном месте [8]. Обычно с датумами приходится иметь дело в GPS-приемниках, в ГИС-системах и в картографии при использовании какой-либо локальной координатной сети. Преобразование координат из одного датума в другой в этих системах может, в большинстве случаев, выполняться автоматически. При неверной установке датума, или же неправильное его преобразование, в итоге возникают горизонтальные и вертикальные ошибки определения места величиной от нескольких до сотни и более метров [8].

Наиболее актуальные на сегодняшний день датумы: WGS-84; Пулково-1942; ПЗ-90.

WGS-84 (World Geodetic System 1984) — глобальный датум, использующий геоцентрический общемировой эллипсоид, вычисленный по результатам точных спутниковых измерений. Используется в системе GPS. WGS-84 как основной датум служит для определения местоположения по всему миру [9].

Пулково-1942 (СК-42, Система координат 1942) — локальный датум, использующий эллипсоид Красовского, максимально подходящий к европейской территории СССР. Основной датум в СССР и на постсоветском пространстве.

ПЗ-90 (параметры Земли 1990) — глобальный датум, основной (с 2012 г.) в Российской Федерации [9].

При создании КГА использовался ПЗ-90, как официально принятый в России датум с 2012 г. (рис. 2). Географически КГА ограничен территорией Сахалинской области и в ArcGIS располагается в границах координатной сетки: 40–56° с. ш. и 138–162° в. д. Шаг сетки составляет по широте 4° и по долготе 6°.

Таким образом обосновано выбраны параметры математической основы, которые необходимо учитывать при создании геоэкологического атласа Сахалинской области в программной среде ArcGIS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салищев К.А. Картография. — М.: Высшая школа, 1971 г. — 248 с.
2. Берлянт А.М. Картография. — М.: КДУ, 2010. — 328 с.
3. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. — М.: КДУ, 2008. — 424 с.
4. Чекалин С.И. Основы картографии, топографии и инженерной геодезии. — М.: Академический Проект, 2009. — 393 с.
5. Андреев Н.В. Топография и картография. — М.: Просвещение, 1985. — 159 с.
6. О единых государственных системах координат: Постановление Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. №1463:

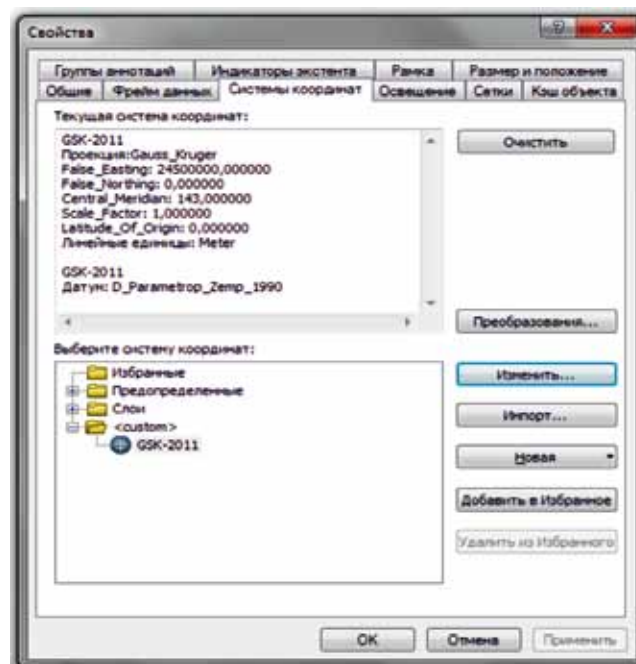


Рис. 2. Основные настроенные параметры математической основы в ArcGIS

Собрание законодательства РФ. - 2012. - 4 с.

7. Справка ArcGIS 10.1 Проекция Гаусса–Крюгера / ArcGIS resources. 2013. URL: <http://resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html> (дата обращения: 10.07.2013).

8. Геодезические датумы // DATA+. 2008-2010 URL: <http://web.archive.org/web/20120213203409/http://www.dataplus.ru/Support/ProjUtility/Datum.htm> (дата обращения: 10.07.2013).

9. Датум // <http://ru.wikipedia.org>. 2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 10.07.2013).

Принята к печати 11 июня 2014 г.
Рекомендована кафедрой геологии
и природопользования СахГУ

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ГУБКИНСКО-СТАРООСКОЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ЗАПОВЕДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ «ЯМСКОЙ СТЕПИ»

Доцент, кандидат геогр.наук **Н.А. Алексеенко**¹,

кандидат геогр.наук **А.А. Медведев**², магистрант **Т.В. Михайлова**¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,

²Институт географии РАН

valtuz@mail.ru, a.a.medvedeff@gmail.com, mikhailovatatyana@mail.ru

Аннотация. Излагаются результаты изучения геохимического загрязнения экосистем одного из участков заповедника «Белогорье» — «Ямской степи» Губкинско-Старооскольским промышленным узлом, одно из предприятий которого вплотную подступило к охранной зоне участка. Исследование велось в двух направлениях: изучение динамики территории по космическим снимкам и применение картографического метода исследования для обработки полевых данных по загрязнению почв и снежного покрова. В результате оценено и подсчитано изменение площадей основных промышленных объектов в районе «Ямской степи», рассчитаны значения суммарных показателей загрязнения почв и построено их распределение, проведено сравнение содержаний отдельных химических элементов с фоновыми значениями и нормативными концентрациями, получены и проанализированы карты пространственного распределения суммарного показателя загрязнения снежного покрова, значений pH и содержания растворенных солей в талой снеговой воде.

Ключевые слова: заповедник, геохимическое загрязнение почв и снежного покрова, картографический метод исследования

Abstract. The article presents the results of geochemical contamination study of ecosystems in the Natural reserve "Belogorie" - "Yamskaya steppe" caused by the GUBKINSKIY Starooskolkim-industrial hub, one of the companies which came close to the Natural reserve's buffer zone. The study was conducted in two directions: analysis the land cover dynamics with the use of remote sensing data and cartographic research method for processing field data on soil and snow cover contamination.

The result of the study is the estimated change of the industrial areas near Yamskaya steppe, the calculated value of soil pollution its distribution, calculated ratio of the individual chemical elements concentration and the background concentration as well as the normative concentrations, maps of total snow cover pollution and maps of pH and dissolved salts in the melted snow water.

Keywords: natural reserve, geochemical soil and snow cover contamination, cartographic research method

Введение. «Ямская степь» — один из участков государственного природного заповедника «Белогорье», имеющий площадь 566 га, эталон степных экосистем Евразии, единственный в мире крупный плакорный массив типичной зональной целинной ковыльно-разнотравно-луговой степи на мощных черноземах в сочетании с дубравами, уникальная территория с десятками видов растений, занесенных в Красную книгу.

Участок «Ямская степь» расположен в Губкинском районе Белгородской области, где на относительно небольшой площади сосредоточен целый ряд предприятий: Лебединский ГОК, Стойленский ГОК, ЗАО «Осколцемент», ООО «ОСМиБТ» (ООО «Объединение строительных материалов и бытовой техники»), комбинат «КМАруда», Оскольский электрометаллургический комбинат, Губкинская ТЭЦ и др. Всего в Старооскольско-Губкинском регио-

не Курской магнитной аномалии сосредоточено около 185 промышленных объектов.

В непосредственной близости от Ямской степи, у ее северной границы находится хвостохранилище Лебединского ГОКа — крупнейшего российского предприятия по добыче и обогащению железной руды, введенного в эксплуатацию в 1971 г. В условиях растущего антропогенного воздействия особенно важна информация о фактическом состоянии биосферы и прогнозы ее будущего состояния [1].

Цель исследования: оценить влияние Губкинско-Старооскольского промышленного комплекса на заповедные экосистемы «Ямской степи». В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

проследить динамику состояния природных комплексов по космическим снимкам;

построить карты геохимического загрязнения территории;

провести анализ полученных картографических материалов.

Проведение работ по добыче руды сказывается на экологическом состоянии региона. Наибольшая нагрузка приходится на верхнюю часть литосферы. Перемещаются громадные массы руды и породы, сложившийся естественный ландшафт заменяется техногенным. В Губкинско-Старооскольском промышленном районе суммарные валовые выбросы пыли и вредных газов достигают 100–102 тыс. т в год. Пылящие поверхности сухих пляжей хвостохранилищ и гидроотвалов представлены главным образом измельченными кварцитами, содержащими более 50% SiO_2 и обогащенными Fe, Mn, Cr, Pb, Zn и другими металлами.

Методы. Для выявления изменений в районе исследования были взяты снимки за 1984 и 2013 гг. По снимкам выделены зоны, занятые основными промышленными предприятиями, в том числе карьеры, хвостохранилища и отвалы пустых горных пород, и получены карты, отображающие состояние промышленности в разные годы, из которых видно, что изменилась площадь, занимаемая промышленными объектами. С 1984 по 2013 гг. территория, занимаемая Лебединским и Стойленским горно-обогатительными комбинатами, увеличилась в 1,3 раза. Стали больше карьеры горно-обогатительных комбинатов, изменились очертания отвалов. В балке Чуфичева плотинами были образованы хвостохранилища. И если по состоянию на 1984 г. в рельефе еще прослеживается сеть оврагов и балок в «Ямской степи», то к 2013 г. естественный рельеф здесь полностью нарушен.

С момента введения на изучаемой территории заповедного режима здесь проводились различные исследования, некоторые из них носили описательный характер, и анализ их одновременной динамики позволяет сделать только текстовые выводы, другие имели координатную привязку и могут быть подвержены математическому и картографическому анализу. Геохимические исследования, наиболее детально проводившиеся в последнее десятилетие, относятся ко второй группе.

Для оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами и другими микроэлементами в 2006 г. в «Ямской степи» про-

дилось исследование, которое включало:

изучение основных геохимических особенностей сопряженного ряда почв заповедника; площадное геохимическое опробование почв участка; фоновые исследования.

Для выявления основных закономерностей фоновой геохимической структуры ландшафтов участка была заложена катена от автономного ландшафта (поверхность плакора) к супераквальному (днище балки Суры), в пределах которой были описаны черноземы типичные и выщелоченные, а также лугово-черноземные почвы. Отбор проб из почвенных разрезов проводился по генетическим горизонтам.

Площадное геохимическое опробование участка проводилось по сетке 100×100 м. Точная привязка точек отбора проб осуществлялась с помощью GPS-приемника Garmin. Пробы отбирались из верхнего горизонта почв (как правило, это была дернина) с глубины 0–5 см методом «конверта». Отбор фоновых проб почв проводился по семи пунктам: Сапрыкино, Огибное, Савенково, Дубровка, Меловое, Дальняя Ливенка и Коньшино.

Лабораторный анализ проб почв на содержание микроэлементов проводился масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой (MS), либо атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой (AES) в Аналитическом сертификационном испытательном центре (АСИЦ) Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья (ВИМС) им. Н.М. Федоровского.

Всего было проанализировано около 100 проб, в каждой из них определялось содержание 54 химических элементов. Как известно, индикаторами загрязнения окружающей среды при добыче и обогащении железной руды являются приоритетные элементы (свинец, серебро, мышьяк, таллий) и сопутствующие (цинк, вольфрам, кобальт, ванадий). Кроме перечисленных элементов-трассеров, рекомендуемых, согласно классификации химических веществ для контроля загрязнения окружающей среды при железорудном производстве и относящихся к разным классам опасности, была выделена группа элементов, которые не являются приоритетными, но многие из которых могут

оказать весьма негативное воздействие на живые организмы — никель, медь, хром, железо, марганец, ванадий, титан, и группу рассеянных элементов, являющихся примесями в руде — индий, селен, теллур, кадмий, германий.

Оценка уровня химического загрязнения почв как индикатора неблагоприятного воздействия на окружающую среду по данным за 2006 г. проводилась по следующим показателям: коэффициент концентрации химического вещества (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c).

K_c определяется отношением фактического содержания определяемого вещества в почве (C_i) в мг/кг почвы к региональному фоновому ($C_{ф}$): $K_c = C_i / C_{ф}$. Суммарный показатель загрязнения равен сумме коэффициентов концентраций химических элементов-загрязнителей и выражается следующей формулой: $Z_c = \sum (K_{c_i} + \dots + K_{c_n}) - (n-1)$, где n — число определяемых суммируемых вещества; K_{c_i} — коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения. При расчете Z_c принимаются во внимание только вещества с $K_c > 1$ [2].

Расчеты были проведены для 15 химических элементов (As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, V, W, Zn). Основными критериями выбора элементов являлись их экологическая значимость и выявленные уровни содержания. По каждой точке отбора проб для каждого из перечисленных выше элементов рассчитывался коэффициент концентрации данного элемента в почве. Затем на каждую точку почвенного опробования высчитывался суммарный показатель загрязнения, включающий значения коэффициентов концентрации выбранных элементов. Работа проводилась с помощью программного пакета ArcGIS 10.2.

Далее содержания химических элементов в почвах сравнивались с предельно допустимыми концентрациями (ПДК), ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК) и фоновыми содержаниями тяжелых металлов и мышьяка в черноземах [3, 4]. Все значения содержания химических элементов подразделялись на три группы:

- 1) меньше фонового и меньше ПДК/ОДК;
- 2) больше фонового и меньше ПДК/ОДК;
- 3) больше ПДК/ОДК и больше фонового.

Результаты. Для каждого химического элемента были построены схемы, которые отображают их пространственное распределение и позволяют оценить отклонение содержания относительно фоновых значений и ПДК/ОДК. Анализ показал, что превышение ПДК наблюдается по двум элементам — свинцу и хрому. Содержание мышьяка на большей части территории не превышает фоновых показателей. На 1/2 площади заповедного участка содержание кадмия и цинка превышает фон. Распределение сурьмы, никеля, меди и ванадия достаточно равномерное, содержание этих элементов на большей части территории превышает фоновое (рис.1).

Для математико-картографического анализа была построена цифровая модель рельефа (по горизонталям, оцифрованным с топографической карты 1968 г. масштаба 1:25 000), затем по ней, используя инструменты Slope и Aspect (ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Surface), были построены карты углов наклона и экспозиции склонов.

Было выявлено, что максимальные значения Z_c приурочены к склонам и днищам балок. Такое распределение может быть связано с влиянием стаявшего снега, осадков и ветра. Однако взаимосвязь загрязнения с экспозицией склонов не выявлена: в большинстве случаев в области с максимальными значениями суммарного показателя загрязнения попадают как склоны северной, северо-восточной, северо-западной, так и южной, юго-восточной, восточной экспозиции. Подсчет коэффициентов корреляции показал слабую прямую связь с углами наклона, что объясняет увеличение суммарного показателя загрязнения на склонах балок.

По значениям суммарного показателя загрязнения Z_d было построено пространственное распределение данного показателя (рис. 2). Величина суммарного показателя имиссии Z_d (уровень загрязнения окружающей среды) по 14 основным поллютантам изменяется на исследуемой территории в достаточно широких пределах: от 5 в урочище Водяное до 64 в урочище Михерево, расположенного вблизи охранной зоны «Ямской степи». В начале марта 2012 г. в районе «Ямской степи» была проведена снегомерная геохимическая съемка [5].

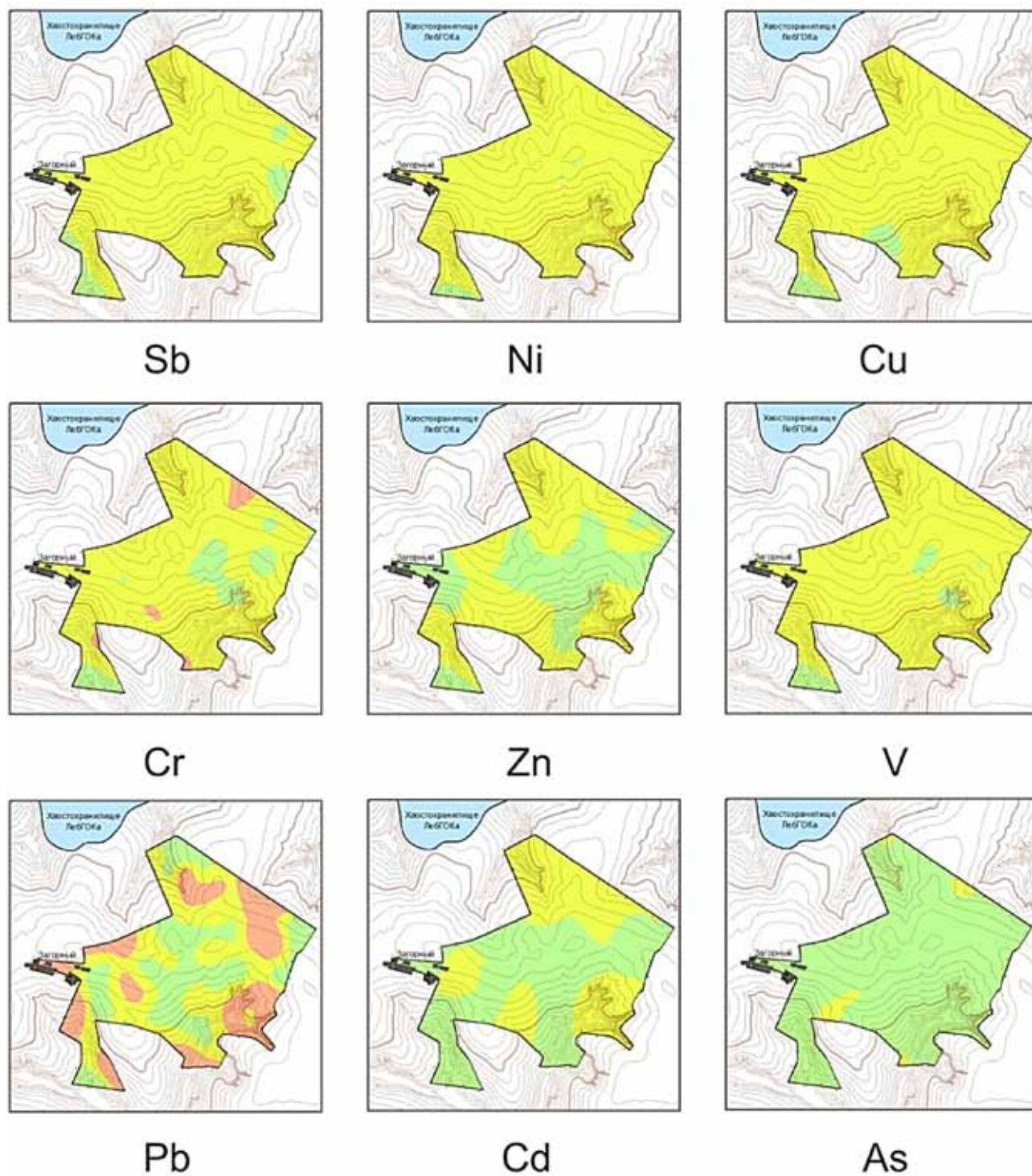


Рис. 1. Распределение содержания химических элементов относительно фоновых значений и нормативных концентраций в почвенном покрове «Ямской степи»:

- больше фоновое значения, больше нормативной концентрации;
- больше фоновое значения, меньше нормативной концентрации;
- меньше фоновое значения, меньше нормативной концентрации

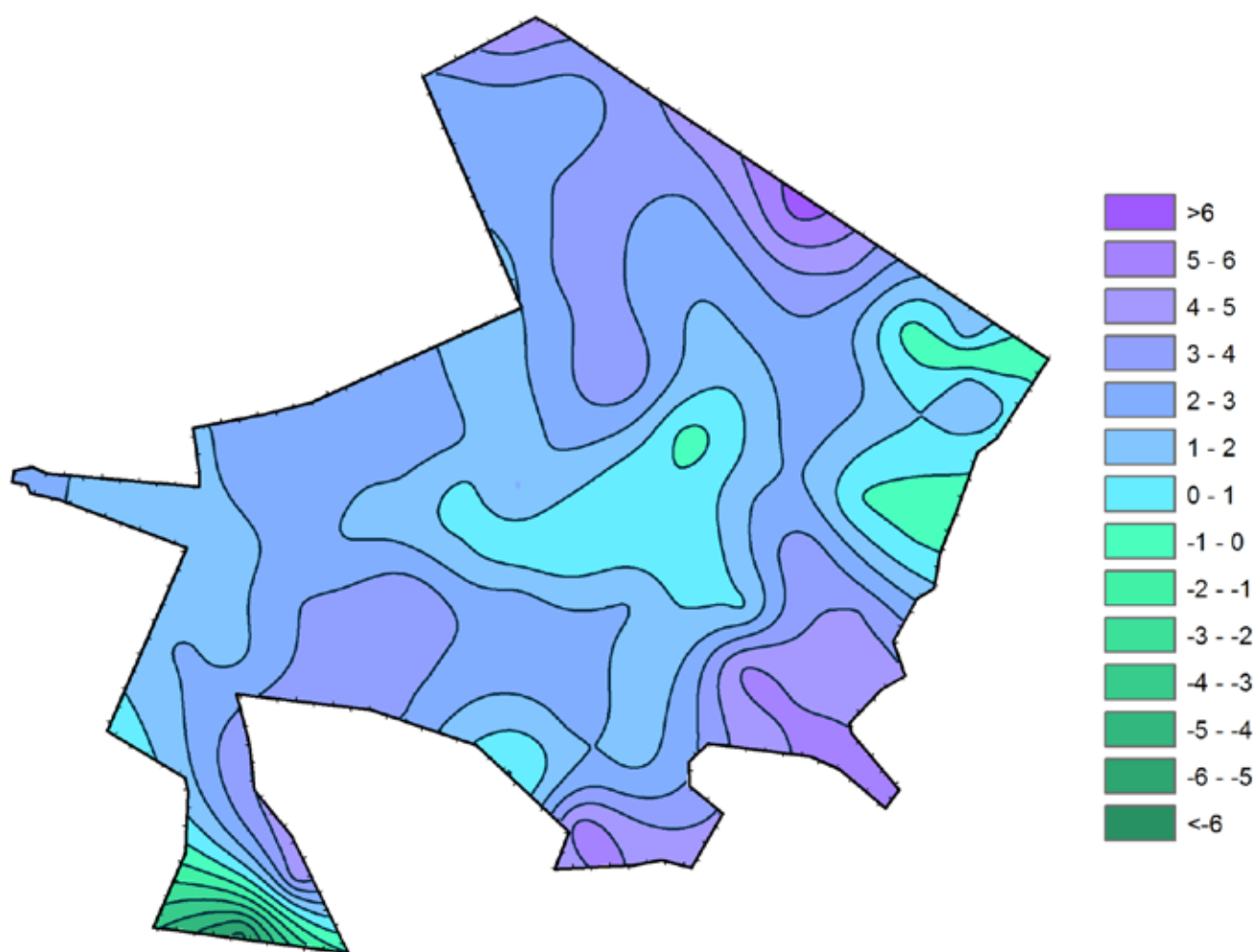


Рис. 2. Распределение суммарного показателя загрязнения

Всего было опробовано 27 точек. По представленным данным было построено распределение суммарного показателя загрязнения снежного покрова. На полученной карте четко выделяются два максимума: к одному из них с севера примыкает Лебединский ГОК, в непосредственной близости от другого восточнее располагается Оскольский электрометаллургический комбинат (рис. 3). Также было построено распределение значений pH. В районе исследований установлено повсеместное подщелачивание снежного покрова относительно фона, при этом наибольшие значения зафиксированы в точках на незначительном удалении от Лебединского ГОК. Относительно фона в снежном покрове исследуемой территории содержание растворенных солей увеличивается в 3–5 раз (до 55 мСм/см), причем локальные максимумы также установлены в непосред-

ственной близости от ГОК, а также вблизи ОЭМК. При наложении изолиний суммарного показателя загрязнения снежного покрова на цифровую модель рельефа SRTM закономерностей, объясняющих выделение локальных максимумов положением в рельефе, обнаружено не было.

Выводы. Исследования в данном районе диктуются необходимостью сохранения уникального эталонного заповедного участка «Ямская степь», который 45 лет находится в зоне влияния комплекса горнорудных и других предприятий. За это время изучались изменения в составе флоры и фауны, а также современное состояние ландшафтов в зоне влияния. Установлено уменьшение численности или исчезновение видов, характерных для естественных дубрав и степей и увеличение разнообразия и обилия луговых мезофилов. Прямая

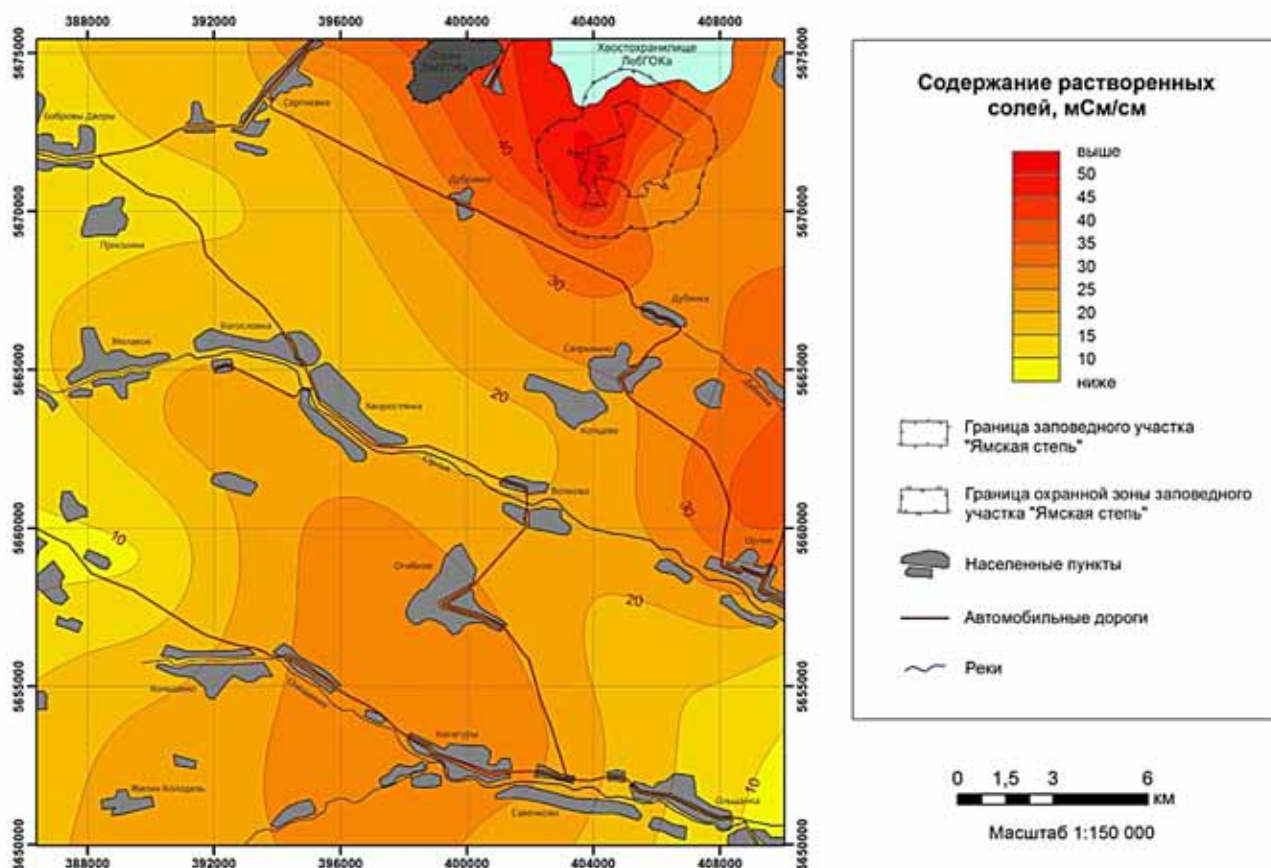


Рис. 3. Содержание растворенных солей в талой снеговой воде в 2012 г.

связь этих изменений с близостью ГОК неочевидна и не доказана.

Самое очевидное воздействие — геохимическое загрязнение воздуха и почвенного покрова. Для визуализации этого воздействия в данной работе был применен картографический метод исследования, результаты которого показывают превышение нормативных концентраций по основным загрязнителям, а также корреляцию наибольших значений загрязнения с близостью Лебединского ГОК и Оскольского электрометаллургического комбината.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 13-05-41094 РГО_a

ЛИТЕРАТУРА

1. Заповедник «Белогорье». URL: http://www.zapovednik-belogorye.ru/jamskaja_step/ (дата обращения 15.10.2013).
2. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
3. ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве» / Библиотека ГОСТов, Стандартов и нормативов URL: <http://www.infosait.ru/>.
4. ГН 2.1.7.2042-06 «Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве» / Библиотека ГОСТов, Стандартов и нормативов URL: <http://www.infosait.ru/>.
5. Отчет «Эколого-геохимическая оценка снежного покрова», заповедник «Белогорье». Кн. 1, Ч. 1. 2012. 178 с.

Принята к печати 18 августа 2014 г.

УДК 550.837.82; 528

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ТОПОГРАФИИ ОСТРОВОВ РОССИЙСКОГО ЗАПОЛЯРЬЯ

Профессор, доктор техн. наук **В.А. Малинников**, кандидат техн. наук **Д.Б. Никольский**,
член-корр. РАН **В.П. Савиных**

Московский государственный университет геодезии и картографии
nikolskiy@inbox.ru, president@miigaik.ru, malinnikov@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты выполненных работ по изучению современного состояния и динамики изменения ледовой топографии островов Российского Заполярья, выполненные в 2013–2014 гг. в рамках исследований научной школы МИИГАиК по Арктике. В качестве основного источника пространственных данных для получения актуальной площадной информации использованы радиолокационные снимки, полученные КА «Sentinel-1A», для оценки вертикальных изменений – данные альтиметрических измерений КА «Cryosat-2» и «ICESat-1».

Ключевые слова: изменение ледников, дистанционное зондирование, мониторинг территории, радиолокационные снимки, альтиметрия

Abstract. Outcomes of the works on studying a current state and dynamics of change in ice topography of islands of the Russian polar region are presented in the article. The works were executed in 2013–2014 by researches of the MIIGAik scientific school on the Arctic. Radar imagery from satellites «Sentinel-1A» is used as the main source of spatial data for the actual areal information, altimetry data from satellites «Cryosat-2» and «ICESat-1» for estimation of vertical changes.

Keywords: change of glaciers, remote sensing, territory monitoring, radar imagery, altimetry

Задача получения современной достоверной топографо-геодезической информации особенно остро стоит для самых северных территорий Российского Заполярья. Этот островной регион, покрытый ледниками, является одним из наименее изученных регионов Российской Федерации и наименее изученным регионом во всей Арктике. Сегодня единственным достаточно полным собранием сведений о ледниках Российского Заполярья являются топографические карты и «Каталог ледников СССР», содержащие информацию о характеристиках ледников по состоянию на 1950–1980 гг.

Современные методы исследования поверхности Земли и выполнения топографо-геодезических работ в региональном масштабе основаны на использовании данных ДЗЗ из космоса, позволяющих в сжатые сроки получить высокоточную геопространственную основу для обширной территории. Из-за сложных погодных условий и недостаточной освещенности поверхности значительную часть време-

ни для арктических территорий целесообразно использовать преимущественно радиолокационные данные и специализированные методы их обработки, позволяющие получить наиболее полную информацию о земной поверхности.

Задача исследования и район работ. Основной задачей работ являлись сбор и предварительная обработка материалов космических съемок изучаемых районов Российской Арктики, получение качественных и количественных оценок изменения размеров оледенения островных ледников за последние 40–60 лет. Районами работ (рис. 1) являются два крупнейших архипелага Баренце-Карского региона Российского Заполярья: Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, часть Северного острова Новой Земли (на рис. 1 граница показана красной линией), а также острова Виктория и Ушакова. Район характеризуется значительной степенью оледенения (среднее значение составляет 53% общей площади), а также крайне сложными метеоусловиями и климатом, что

существенно затрудняет ведение регулярного космического мониторинга [1].

Исходные данные. К исходным данным относятся: топографические карты, радиолокационные и оптические космические снимки, альтиметрические профильные измерения. В рамках исследования был сформирован обширный архив данных на исследуемые территории, содержащий более 350 единиц «площадной» информации и более 6 000 единиц «профильной» высотной информации.

Топографические карты — базовая основа, отражающая состояние местности на 1952–53 гг. (масштабы 1:100 000 и 1:200 000).

Радиолокационные данные — основной вид исходной актуальной информации о современном состоянии ледниковой поверхности [2, 3]. Данные используются как для получения современных границ островов и ледниковых комплексов, так и для получения современных значений высот поверхности и их изменений (интерферометрическая обработка). Основные виды радиолокационных данных, используемых в работе: Sentinel-1A (пространственный анализ, 2014 г.); ERS-1/2, Envisat, TerraSAR-X/TanDEM-X (пространственный анализ и определение изменений высот, 1995–2011 гг.). Данные Sentinel-1A являются наиболее современными и доступными для проведения регулярного регионального мониторинга, подбор и получение снимков осуществлялось через веб-ресурс <https://scihub.esa.int/dhus/>.

Оптические данные — дополнительный источник пространственной информации о ледниковой поверхности, позволяют более четко дешифрировать границы ледниковых комплексов и береговые линии и могут использоваться в качестве основных данных, но ввиду сложных метеоусловий количество таких данных существенно ограничено. Использовались следующие данные: Landsat-5/7/8 за 1985–2014 гг., ASTER Terralook за 2009–2012 гг. (источник <http://glovis.usgs.gov/>).

Альтиметрические измерения — источник данных о современных высотах ледниковой поверхности. Профильные измерения со спутников ICESat (2003–2009 гг.) и Cryosat-2 (2012 г.), имеют наилучшие точности и охват территории. Данные этих систем распространяются бесплатно и могут быть скачаны со следующих сайтов: ICESat-<http://earthexplorer>.

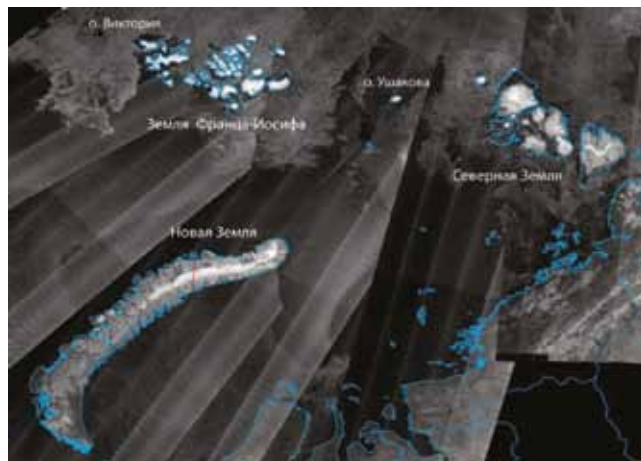


Рис. 1. Актуальная мозаика радиолокационных снимков Sentinel-1A (выравнивание тона выполнено по суше). Даты съемки 07–17.10.2014

usgs.gov/, Cryosat-2 — <https://earth.esa.int/web/guest/data-access/browse-data-products>.

Количественный анализ площадных изменений. Островное покровное оледенение является наиболее динамично изменяющимся фактором, который во многом определяет климат в арктическом регионе. Опубликованные данные показывают, что общая площадь островного покровного оледенения в российском секторе Баренцево-Карского региона с 1950 по 2000 гг. уменьшилась более чем на 2300 км² [4]. Использование данных Sentinel-1A, полученных в период 7–17 октября 2014 г., а также снимков Landsat-8 за 2013–2014 гг., имеющих фрагментарное покрытие исследуемого региона, позволило определить современные масштабы оледенения региона и получить современные береговые линии островов и границы ледниковых комплексов.

Для мониторинга площадных изменений необходимо, по крайней мере, два источника пространственной информации показывающих состояние местности за разные даты. В нашем исследовании начальный момент мониторинга — 1952–1953 гг. (контура с топографических карт). Окончание периода мониторинга — 2014 г. (для ряда островов — 2012 г.), также для большинства исследуемых островов приводятся количественные характеристики за период 1995–2003 гг. Мониторинг площадных изменений может выполняться несколькими путями.

1. Визуальное дешифрирование космических изображений нацелено на выявление и

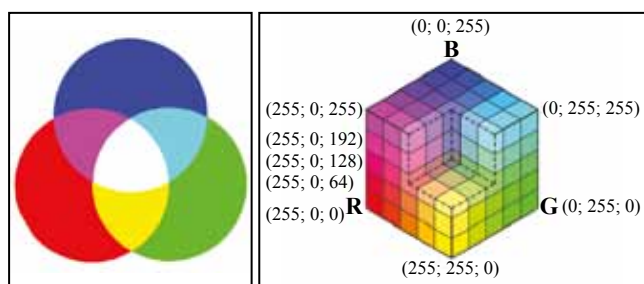


Рис. 2. Аддитивный синтез цветов

классификацию типов поверхности, топографических объектов, их площадных и линейных изменений при сравнении с имеющимися контурами объектов, а также получение качественных и количественных характеристик объектов топографии, в нашем случае ледниковых комплексов и границ островов.

2. Автоматизированное выделение изменений на основе разновременных космических снимков. Разновременные снимки — важный источник объективной пространственно-временной информации при мониторинге изменений природных объектов. Однако сложность одновременной интерпретации количественных и качественных изменений исследуемых объектов требует применения определенных приемов при работе с такой информацией. На экране компьютера синтезирование осуществляется аддитивным способом — смешиваются красный (R — Red), зеленый (G — Green) и синий (B — Blue) цвета (рис. 2). В зависимости от выбранных для компонент снимков за две разные даты (и/или их отдельных поляризаций/каналов), можно получить различные варианты синтеза, оптимальные для решения конкретной задачи дешифрирования.

Для создания цветного разновременного изображения снимки необходимо взаимно трансформировать, наличие даже небольших погрешностей в ориентировании снимков (более 1–2 пикселей изображения) может привести к эффекту «сдвигов» на изображении и существенно ухудшит дешифровочные свойства синтезированного снимка.

Для наилучшего отображения изменений ледниковых комплексов экспериментально установлены следующие оптимальные варианты совмещения двух снимков:

красная компонента находится наверху при аддитивном синтезе, для нее выбирается наиболее информативные более ранние данные. В

нашем случае это преимущественно радиолокационные данные ERS-2 (пространственное разрешение 30 м, поляризация VV). Для мультиспектральных оптических данных выбирается один из каналов нового снимка. В нашем случае использованы несколько снимков Landsat-5 (пространственное разрешение 30 м, красный канал); *зеленая компонента* при аддитивном синтезе располагается следом за красной. В качестве значений для нее желательно использовать аналогичный вид данных, как и для красной компоненты, но за актуальную дату. При использовании радиолокационных данных Sentinel-1A (пространственное разрешение 50 м), полученных при нескольких поляризациях HH (горизонтальная) и HV (горизонтально-вертикальная кроссполяризация) предпочтительнее кроссполяризация HV, так как в ней обеспечивается более контрастное отображение границы материковый лед — морской припайный лед;

синяя компонента располагается самой последней, в качестве значений для нее используются данные, как и для красной компоненты.

В результате такого синтеза пиксели, в которых произошло уменьшение амплитуды радиолокационного сигнала, либо спектральной яркости для оптического снимка будут иметь красный или розовый цвет (уменьшение площади ледника), пиксели с увеличившимися значениями — зеленый цвет (увеличение площади ледника). На рис. 3–4 приведены несколько примеров мультिवременных композиций с количественными характеристиками изменений за период 1995–2014 гг.

Описанные методы выявления изменений легли в основу технологической схемы картографирования изменений ледниковых комплексов и береговых линий островов (рис.5). В результате оцифровки топографических карт получены береговые линии и границы ледниковых комплексов за 1952–1953 гг. На основе радиолокационных данных (ERS-1/2, 1995–1996 гг.) и оптических снимков (Landsat-5/7, 1998–2003 гг.) в результате визуального дешифрирования получены контура за 2000 гг. Далее мониторинг изменений выполнялся на основе разновременных космических снимков (период 2000–2014 гг.). Основными данными ввиду полного безоблачного покрытия выбраны радиолокационные данные, без-

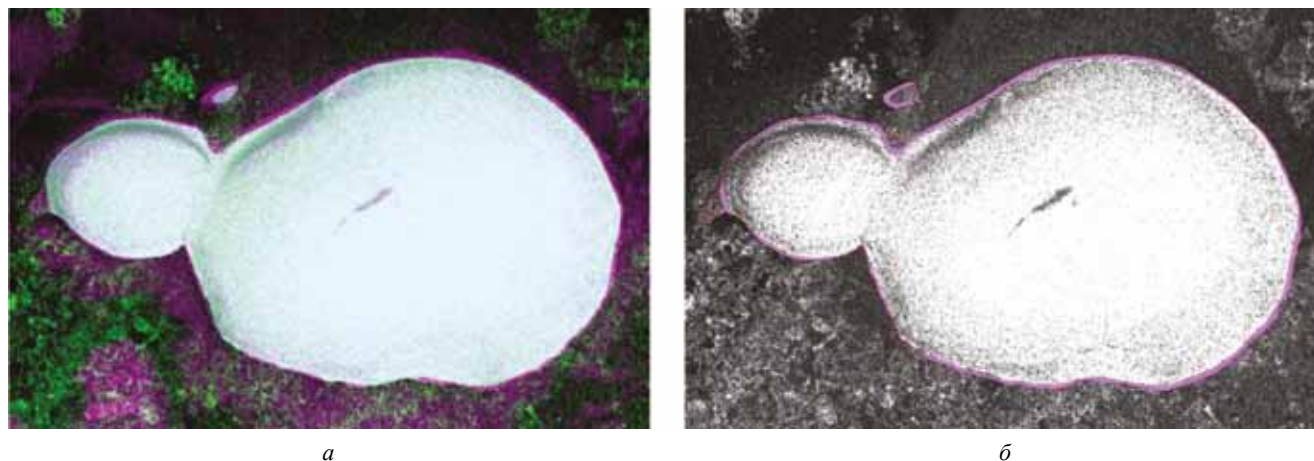


Рис. 3. Остров Ева-Лив, Земля Франца-Иосифа:

а — мультивременной композит на основе радиолокационных снимков ERS (15.10.1995) и Sentinel-1A (06.10.2014). Розовый цвет вдоль берега — уменьшение ледникового купола; *б* — снимок Sentinel-1A (06.10.2014) и слой изменений за период 1995–2014 гг. Площадь ледяного покрова уменьшилась на 8,4 км² (площадь острова — на 8,2 км²)

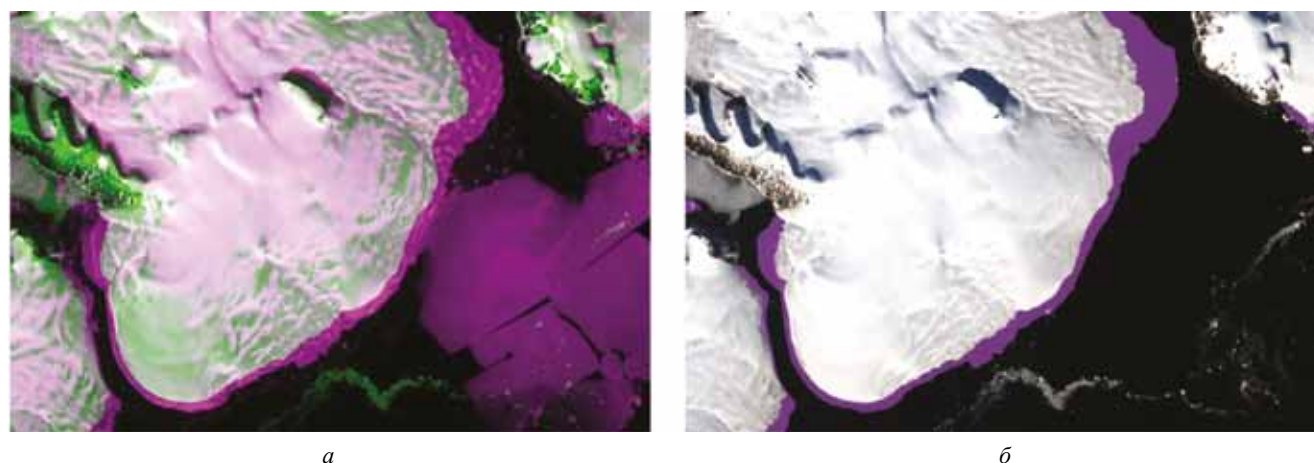


Рис. 4. Остров Солсбери, Земля Франца-Иосифа:

а — мультивременной композит на основе снимков Landsat-5 (25.07.1986) и Landsat-8 (09.08.2014). Розовый цвет вдоль берега — уменьшение ледяного покрова; *б* — снимок Landsat-8 (09.08.2014) и слой изменений за период 1986–2014 гг. Площадь ледяного покрова уменьшилась на 66,7 км²

облачные оптические снимки с минимальным снежным покровом имеют фрагментарное покрытие и использованы для точного определения границ ледниковых комплексов на суше, а также для уточнения береговых линий в зонах припайного льда. На основе полученных контуров, а также участков изменений с использованием ГИС инструментов выполнен расчет количественных показателей изменений, произошедших за период 1952–2014 гг. для исследуемых территорий (табл.1).

Точность полученных итоговых результатов соответствует масштабу используемых топографических карт.

Полученные результаты согласуются с опубликованными численными показателями

сокращения оледенения за 1950–2000 гг. и демонстрируют дальнейшую тенденцию таяния ледников в данном регионе [4].

В табл. 2 приводятся подробные численные показатели сокращения оледенения для ряда отдельных островов Земли Франца-Иосифа. Значения изменений, полученные за два временных периода, показывают существенное увеличение темпов таяния ледников и сокращение площади островов, имеющих высокий процент оледенения территории. Среднее значение изменения площади ледниковых комплексов за 1953–2000 гг. — 30 км² соответствует среднему значению изменения площади за период 2000–2014 гг. — 28 км², при том что второй период мониторинга втрое короче первого.

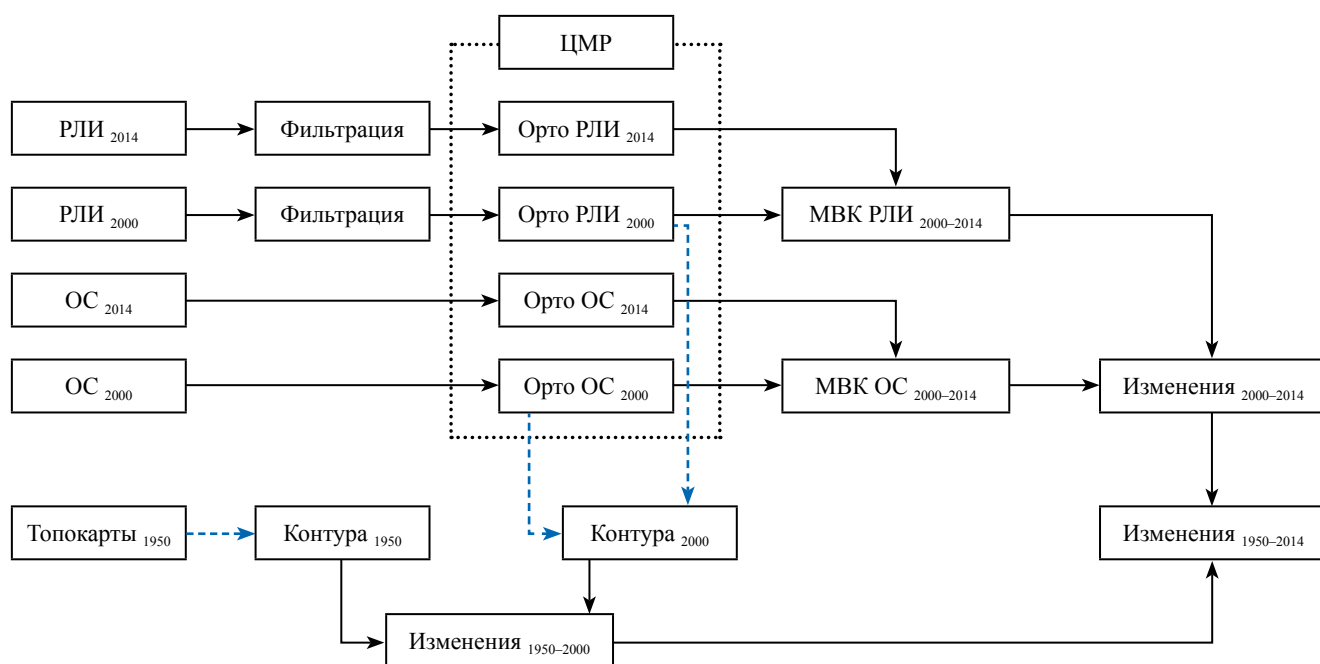


Рис. 5. Технологическая схема картографирования изменений:

РЛИ — радиолокационные изображения; ОС — оптические снимки; МВК — мультивременные композиты

Таблица 1

Сокращение покровного оледенения на исследуемых территориях в 1950 – 2014 гг.

Район	Покровное оледенение, км ²					
	1950 г.	2000 г.	2014 г.	1950–2000 гг.	2000–2014 гг.	1950–2014 гг.
Новая Земля (север)*	12326	11442	11271	–884	–171	–1055
Земля Франца-Иосифа	13734	13204	12723	–530	–481	–1011
Северная Земля	17177**	16910	16682	–267**	–228	–495**
Остров Ушакова	330	327	310	–3	–17	–20
Остров Виктории	10,6	8,1	6,1	–2,5	–2	–4,5
	43578	41891	40992	–1687	–899	–2585

Примечания.

* — количественные оценки выполнены для части о. Северный Новой Земли.

** — состояние местности на топографических картах в пределах архипелага показано за разные годы (1956–1988 гг.).

Таблица 2

Сводная таблица выявленных изменений по ряду отдельных островов Земли Франца-Иосифа

Остров	S, км ²			S ^{ice} , км ²			S ^{изм?} , км ²		S ^{ice} _{изм?} , км ²	
	1953	2000*	2014	1953	2000*	2014	1953–2000*	2000*–2014	1953–2000*	2000*–2014
Ева-Лив	271	258	250	270	256	248	–13	–8	–14	–8
Галля	998	978	917	910	876	832	–20	–61	–34	–44
Рудольфа	306	298	288	292	280	274	–8	–10	–12	–6
Солсбери	958	906	851	911	849	799	–52	–55	–62	–50
Циглера	411	403	376	357	340	324	–8	–27	–17	–16
Чамп	355	348	322	286	269	256	–7	–26	–17	–13
Ла-Ронсьер	456	439	406	402	384	370	–17	–33	–18	–14
Грезм-Белл	1732	1710	1644	1217	1180	1132	–22	–66	–37	–48
Земля Вильчека	2080	2050	1980	1870	1822	1770	–30	–70	–48	–52
Земля Георга	2821	2755	2659	2241	2157	2087	–66	–96	–84	–70
Земля Александры	1070	1052	1004	783	745	720	–18	–48	–38	–25
Артура	103	98	101	89	84	82	–1	–1	–5	–2
Гукера	526	506	464	440	414	392	–20	–42	–26	–22
Сальм	286	275	249	264	253	230	–11	–26	–11	–23

Примечания.

* — количественные оценки выполнены преимущественно по данным 1995–1996 гг., но также использованы данные 2000–2003 гг.

Максимальные отступления выводных ледников, выявленные в ходе космического мониторинга на островах архипелага наблюдаются для ледников Знаменитый — 3,3 км (о. Земля Вильчека), № 10 — 3,2 км (о. Солсбери), № 1 — 3 км (о. Луиджи) и Сонклар — 2,2 км (о. Галля). Интересно отметить, что минимальная ширина пролива Лондорф (между островами Солсбери и Чамп) увеличилась в 5 раз с 0,2 км в 1953 г. до 1 км в 2014 г., а минимальная ширина пролива Родса (между островами Солсбери и Винер-Нёйштадт) увеличилась более чем в 2 раза с 1,1 км в 1953 г. до 2,3 км в 2014 г. Также подтверждается гипотеза об острове Литтрова [5, 6]. На топографических картах и в настоящий момент он все еще является полуостровом о. Галля, но перешеек между ними сокращается очень интенсивно и на октябрь 2014 г. его длина составляет около 0,5 км.

Для северной части острова Северный Новой Земли максимальные отступления выводных ледников, выявленные в ходе космического мониторинга, наблюдаются для ледников Вера — 7,9 км, Велькена — 4,3 км и Иностранцева — 4 км. Для архипелага Северная Земля максимальные изменения отмечаются для ледникового шельфа Матусевича на острове Октябрьской Революции и составляют более 10 км (1984–2014 гг.) [6].

Количественный анализ вертикальных изменений. Источником базовых (исходных) высот поверхности являются топографические карты и созданные на их основе цифровые модели рельефа (ЦМР, шаг 25–50 м, в зависимости от масштаба карт).

Для получения актуальных сведений о высотах ледниковых комплексов могут быть использованы: оптические и радиолокационные стереоданные, радиолокационные интерферометрические пары снимков, а также самый доступный источник высотной информации — альтиметрические измерения. Из-за малого числа качественных данных, стереосъемка не может выступать в качестве основного источника информации о высотах, в то же время радиолокационные интерферометрические снимки и альтиметрические измерения обеспечивают многократное покрытие современными данными района работ. Альтиметрические измерения ICESat (лазерный альтиметр) пред-

ставляют собой точечные профильные измерения высот поверхности. Измерение высоты выполняется на участке около 70 м в диаметре, расстояние между соседними измерениями составляет около 170 м вдоль орбиты спутника, точность измерения достигает 10 см [7]. Измерения Cryosat-2 (радиолокационный альтиметр) в интерферометрическом режиме имеют не линейный характер, ввиду того, что в отличие от узконаправленного лазера, здесь измерение проводится в Ku-диапазоне в достаточно широкой полосе поперек орбиты спутника, и сами измерения приурочены к максимальным высотам, так как от них идет первое отражение радиосигнала. Измерение высоты выполняется на участке около 250 м в диаметре [8]. Эти два вида альтиметрических данных удачно дополняют друг друга и позволяют получить пространственно распределенные измерения высот ледниковых комплексов (рис. 6).

Сравнив современные высоты ледниковой поверхности, полученные альтиметром, и высоты с топографических карт, можно получить множество измерений вертикальных изменений по отдельным ледникам. На рис. 7 представлены два сравнительных пересекающихся профиля по острову Ла-Ронсьер, Земля Франца-Иосифа, характеризующие вертикальные изменения поверхности.

Использование только альтиметрических измерений не позволяет получить полную картину вертикальных изменений высот ледни-

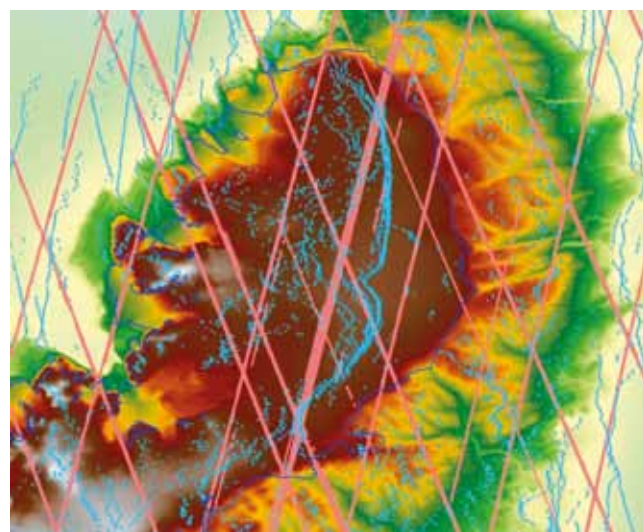


Рис. 6. Комбинация ЦМР и альтиметрических профилей ICESat (розовый цвет) и Cryosat-2 (голубой цвет). Новая Земля

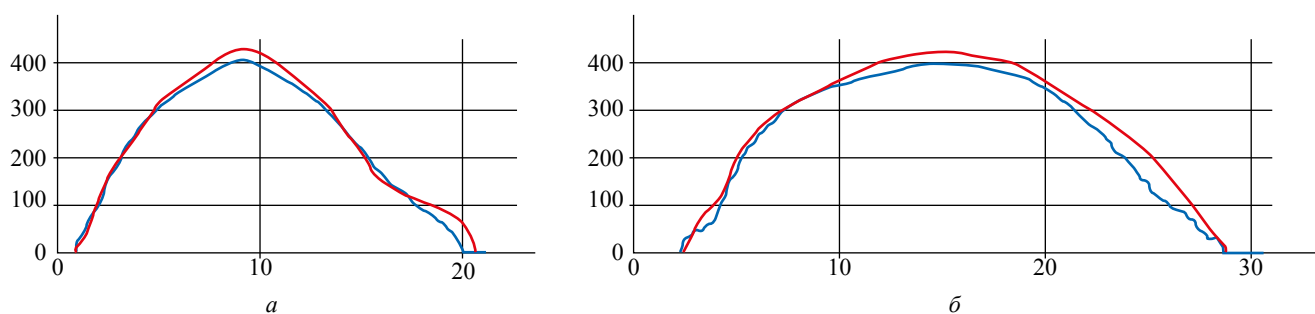


Рис. 7. Линейные сравнительные профили ICESat (синий) и топокарты (красный), характеризующие изменение поверхности ледника за 60 лет:

а — о. Ла-Ронсьер; б — Земля Франца-Иосифа

ковой поверхности и количественные оценки. Для решения этой задачи в рамках международного проекта MAIRES была разработана комплексная профильно-площадная методика совместной обработки альтиметрических измерений и радиолокационных интерферометрических данных для картографирования и анализа изменений высот покровных ледников [6, 9, 10]. Особенностью получения интерферометрических пар снимков, на основе которых может быть построена ЦМР, является то, что для большинства съемочных систем, за исключением данных TerraSAR-X/TanDEM-X, такие пары снимков могут быть получены в лучшем случае с периодом в одни сутки. При построении ЦМР на основе таких данных в зонах выводных ледников, которые имеют значительные скорости течения, возникают серьезные ошибки, которые могут

быть учтены и исправлены по массиву альтиметрических измерений. Дополнительно, альтиметрические измерения являются опорной информацией для определения, анализа и картографирования вертикальных изменений [9]. По данной методике в рамках международного проекта MAIRES были получены количественные показатели изменений ряда наиболее удаленных ледниковых комплексов Российского Заполярья за период 1950–2010 гг.

В табл. 3 приводятся актуализированные и новые результаты оценки вертикальных изменений высот ледниковой поверхности для ряда ледниковых комплексов, полученные по комплексной профильно-площадной методике совместной обработки альтиметрических измерений и радиолокационных интерферометрических данных (рис.8).

Таблица 3

Количественные оценки вертикальных изменений высот ледниковых поверхностей по ряду отдельных островов 1950–2014 гг.

Остров	Площадь оледенения, км ²	Изменения	
		Площадь, км ²	Высота, м
Виктория	6,1	–4,5	–10,1
Артура	82	–7	–4,3
Рудольфа	274	–18	–11,7
Ева-Лив	248	–22	–9
Ла-Ронсьер	370	–32	–19
Земля Александры	720	–63	–10,2
Ушакова	310	–20	6,2
Шмидта	394	–44	0,1
Большевик*	2737	–270	–8,7
Новая Земля – Северная ледниковая шапка**	1976	–204	+46**

Примечания.

* — состояние местности на топографических картах в пределах острова показано за разные годы (1981–1988 гг.).

** — количественные оценки получены только для Северной ледниковой шапки о. Северный Новой Земли. Полученное среднее значение изменения высоты содержит существенную ошибку топографической карты.

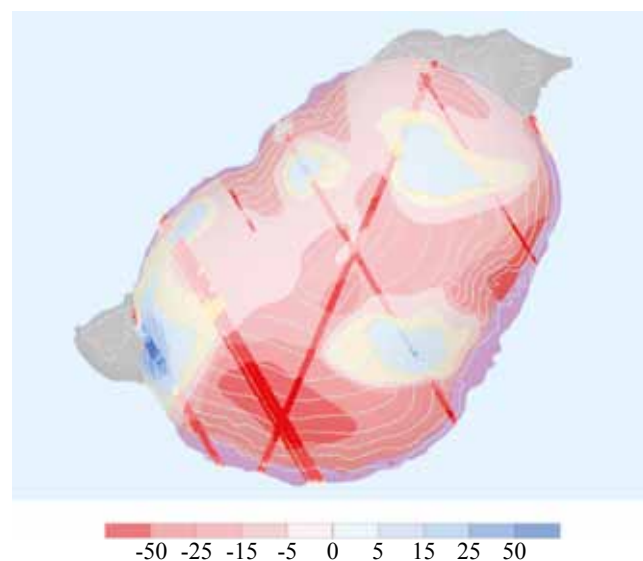


Рис. 8. Цифровая модель изменений 1953–2014 гг. (внизу дана шкала изменения высот в метрах), остров Ла-Ронсьер

Выводы. Проведенные исследования позволили выполнить количественный анализ как площадных, так и вертикальных изменений в регионе исследования. Полученные результаты подтверждают имеющуюся тенденцию к серьезному сокращению площади ледников в Российском Заполярье. Общее уменьшение площади оледенения в рамках района исследования сократилось более чем на 2500 км², причем 35% этой площади — это изменения за последние 15 лет. Наибольшие темпы сокращения площади оледенения в 2000–2014 гг., относительно периода 1953–2000 гг., наблюдаются на архипелаге Земля Франца-Иосифа, имеющего самый большой процент оледенения в регионе. Среднегодовое значение изменения площади оледенения увеличилось практически в 3 раза: с 12 до 32 км²/год. С появлением доступных высококачественных радиолокационных (Sentinel-1A) и оптических (Landsat-7) данных можно вести мониторинг территории Российского Заполярья и обновлять сведения о границах ледниковых комплексов и береговых линиях островов через год-два на регулярной основе. Возможности по оценке высотных изменений на текущий момент времени несколько ограничены (можно получить общие количественные оценки и карту зон изменений высот поверхности), либо требуют вложения очень значительных денежных средств для закупки актуальной ЦМР, построенной на основе данных TerraSAR-X/TanDEM-X.

В связи с интенсификацией развития арктических регионов все острее встает проблема по полному обновлению картографического обеспечения всей территории Российского Заполярья.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президента Российской Федерации (грант № 14.Z57/145777-НШ «Изучение современного состояния и динамики изменения ледовой топографии Арктики по материалам космических съемок»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Савиных В.П., Малинников В.А., Шаров А.И. Дистанционные исследования топографических изменений в высокоширотной Арктике // Комплексные исследования Арктики. М.: МИИГАиК, 2006. — С. 86–97.
2. Малинников В.А., Никольский Д.Б. Методика обработки радиолокационных данных для целей топографического мониторинга высокоширотной Арктики // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2011. — №4. — С. 71–78.
3. Савиных В.П., Шаров А.И. Концепция космического топографического мониторинга Арктики // Комплексные исследования Арктики. М.: МИИГАиК, 2006. — С. 17–25.
4. Шаров А.И., Бушуева И.С., Никольский Д.Б. Спутниковый мониторинг и региональный анализ динамики ледников Баренцево-Карского региона (СМАРАГД) / Сб. статей по итогам международной научно-технической конференции, посвященной 230-летию основания МИИГАиК, Вып. 2.4.1. — 2009. — С. 53–57.
5. Шаров А.И. Практическое применение спутниковой фототопографии для целей картографирования Земли Франца-Иосифа // Комплексные исследования Арктики. М.: МИИГАиК, 2006. С. 121–145.
6. MAIRES (FP7 Space GMES GA 263165) project homepage <http://dib.joanneum.at/MAIRES/>
7. Abshire J., Sun X. et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance // GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 32, 2005. 4 p.
8. Cryosat Mission and Data Description https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=16072&name=DLFE-877.pdf
9. Никольский Д.Б. Профильно-площадная методика дистанционного зондирования ледников // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2013. — №5. — С. 77–83.
10. Sharov A.I., Nikolskiy D.B. Satellite map series of long-term elevation changes on Eurasia's northernmost ice caps. Proc. of the 33d EARSel Symposium, Matera, 2013. 14 p.

Принята к печати 26 ноября 2014 г.

Рекомендована кафедрой
космического мониторинга МИИГАиК

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДАННЫХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДОСТУПА К РЕЗУЛЬТАТАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ЛУНЫ

Аспирант **Е.В. Матвеев**, кандидат техн. наук **И.П. Карачевцева**,
ведущий программист **А.С. Гаров**, ведущий инженер **В.Д. Патратий**,
аспирант **А.А. Коханов**, аспирант **Н.А. Козлова**, нач. лаборатории **Д.С. Лубнин**
Московский государственный университет геодезии и картографии
I_karachevtseva@miigaik.ru

Аннотация. Представлена модель планетных данных, разработанная для управления пространственной информацией в базе геоданных, обеспечивающей хранение и доступ к результатам исследований поверхности небесных тел. Модель планетных данных представляет собой информационную схему для описания используемого набора классов пространственных объектов, включая структуру их атрибутов и топологические отношения. При разработке схемы данных выполнен анализ существующих стандартов на метаданные географической информации с оценкой возможности их применения для описания результатов планетных исследований. В предложенной схеме данных на примере Луны предусмотрена возможность использования нескольких стандартов, в том числе PDS 4, что обеспечивает гибкость управления планетной информацией. Модель планетных данных предназначена для эффективного доступа к системе хранения результатов тематической обработки данных дистанционного зондирования Луны.

Ключевые слова: модель планетных данных, Луна, данные дистанционного зондирования небесных тел Солнечной системы, база геоданных, метаданные, Геопортал

Abstract. The article presents a planetary data model developed for spatial information management in the database which provides storage and access to the results of research of planetary bodies. The developed planetary data model is an information scheme which describes a set of used spatial feature classes, including their attributive structure and topologic relations. We have analysed the existing standards on geographic information metadata and evaluated the possibility to use them for planetary data. The proposed information scheme, by the example of the Moon, supports usage of several standards, including PDS 4, what provides flexibility of planetary information management. The planetary data model is designed for effective access to the storage of the results of thematic processing of the Moon remote sensing data.

Keywords: planetary data model, Moon, remote sensing of the celestial bodies of Solar system, geodatabase, metadata, Geoportal

Введение. В соответствии с российской космической программой планируется несколько миссий к различным телам Солнечной системы: к Луне (проекты Луна-Глоб и Луна-Ресурс), к Марсу (проект Экзо-Марс), в систему Юпитера (проект Лаплас-II). Целью данной работы является разработка структуры базы пространственных данных (базы геоданных) для формирования и развития информационной системы, обеспечивающей хранение и доступ к результатам тематической обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) планет и спутников Солнечной системы, макет которой был разработан с помощью ГИС- и веб-технологий [1] в виде Узла планетных геоданных [2]. Создаваемое хранилище является практической реализацией предложенной ранее концепции Узла геодезических и картографических планетных данных [3] как российского сегмента хранилища информации по

небесным телам. В связи с приоритетом исследований Луны [4], расширение системы предполагается осуществлять на примере результатов детальных исследований поверхности естественного спутника Земли.

Важным шагом при формировании информационной системы является разработка *метаданных*, которые должны обеспечить поиск данных, методы доступа к ним и способы их использования. Для создания системы поддержки метаданных необходима информационная модель или *схема данных*, детально характеризующая наборы классов пространственных объектов, структуру их атрибутов и взаимные отношения. На основе схемы данных формируются стандартизованные и унифицированные описания пространственной информации, используемые для управления, поиска и обмена данными. Метаданные или данные о данных, в принципе, могут быть

представлены в виде простого текстового описания и храниться вместе с файлами данных. Но в этом случае возникают проблемы, связанные с управлением информацией: загрузка в хранилище, хранение и поиск, связь с исходными источниками, организация доступа и распространение данных. Для эффективного решения этих задач необходимо создание автоматизированной системы поддержки метаданных, обеспечивающей «машинное» понимание и чтение этой информации.

Таким образом, модель планетных данных должна обеспечивать:

- полнофункциональное описание результатов тематической обработки ДДЗ небесных тел при формировании информационного обеспечения системы планетных данных;

- поддержку пространственной компоненты планетных данных;

- поддержку классификаторов для различных типов и форматов результатов обработки (растровых, векторных и т.п.);

- возможность поддержки технологических и интерфейсных решений для организации доступа к данным (геосервисы);

- возможность формирования внешних связей с информационными хранилищами других организаций, в том числе между научными учреждениями и университетами, для обмена данными (интероперабельность системы).

Анализ стандартов для описания пространственных данных. Для разработки системы метаданных в целях оптимизации процессов хранения и организации доступа к результатам тематической обработки ДДЗ небесных тел необходимо сформировать конкретную концептуальную модель (схему данных), которая бы учитывала все особенности планетной информации и ее пользователей. При этом метаданные должны быть одинаково понимаемы пользователями и не зависеть от форматов и структуры данных, а также конкретных программных средств. Выполнение этих требований обеспечивается использованием международных и национальных стандартов.

Особенностью формируемой информационной системы планетных данных является учет пространственной компоненты и гео визуализация результатов тематических исследований поверхности небесных тел Солнечной

системы. Поэтому при разработке модели планетных данных выполнен анализ существующих стандартов для описания пространственной информации, среди которых были рассмотрены следующие:

- Международный стандарт ISO 19115-2003 «Geographic information – Metadata» [5];

- Российский ГОСТ 52573-2006 «Географическая Информация. Метаданные» [6];

- Европейский стандарт INSPIRE [7];

- Стандарт метаданных Федерального Комитета Географических Данных США (Federal Geographic Data Committee, FGDC) [8].

Стандарт ISO 19115 создавался на основе опыта описания пространственных данных Земли. Отечественный стандарт метаданных ГОСТ 52573-2006 соответствует международному стандарту ISO 19115:2003 в части методологии формирования описания пространственных данных, а также требований к правилам создания метаданных. В российском стандарте отброшена большая часть неиспользуемых элементов ISO 19115 и добавлены элементы и специализированные словари, применяемые для описания отечественного рынка геоданных.

Европейский стандарт INSPIRE [7] направлен на то, чтобы обеспечить простой доступ к гармонизированным (стандартизованным) географическим описаниям. INSPIRE основан на стандартах ISO, например, в состав его профиля включены элементы стандарта ISO 19119:2005 «Географическая информация – Сервисы». Широкое распространение пространственных веб-сервисов (геосервисов), число которых исчисляется сотнями, делает их эффективный поиск определенной проблемой, поэтому так важна возможность стандартизованного описания при формировании инфраструктуры пространственных данных [9]. Например, поиск картографических веб-сервисов, использующих спецификации ISO 19115:2003 (WMS, WCS, WFS и др.), реализован на европейских национальных гео-порталах, использующих стандарт INSPIRE [10].

Стандарт FGDC (Federal Geographic Data Committee) — национальный стандарт метаданных, разработанный Федеральным комитетом по географическим данным США [8].

В стандарте FGDC предложены наименования элементов данных и их структура, но не указываются методы, с помощью которых эта информация может быть организована в компьютерной системе или в процессе передачи/представления данных пользователю. Однако стандарт FGDC содержит более 200 элементов, поэтому он обеспечивает много возможностей для создания расширенных описаний пространственной информации по сравнению с другими стандартами.

В формируемой информационной системе геодезических и картографических планетных данных предполагается хранение как векторной, так и растровой пространственной информации. Все стандарты, перечисленные выше, разработанные для описания земной информации, могут быть использованы в качестве исходной основы для описания планетных данных, представленных в векторном виде. Для целей рассматриваемых задач, по нашему мнению, наиболее удобным является стандарт FGDC, как имеющий большой набор элементов. Немаловажным также является то, что этот стандарт встроен и поддерживается в ArcGIS (ESRI™) — программном обеспечении, используемом в рамках данной работы для обработки и анализа пространственной планетной информации, а также для представления результатов в виде тематических карт планет и спутников.

Для описания данных космических миссий, результаты которых, в основном, хранятся в растровом формате, применение стандартов, предложенных для описания земных геоданных, невозможно, поскольку в них отсутствуют необходимые элементы. Для описания исследовательских миссий к телам Солнечной системы разработан специальный стандарт PDS [11], созданный американским космическим агентством NASA и предназначенный для хранения результатов космических миссий в системе хранения Planetary Data System. Стандарт PDS используется и другими национальными космическими агентствами, включая Европейское космическое агентство (ESA) [12], Космическое агентство Японии (JAXA). Предполагается, что этот стандарт в новой версии PDS4 [11] также будет использоваться в ИКИ РАН для хранения результатов будущей миссии Экзо-Марс [13].

От всеобъемлющих и обобщенных моделей, представленных в описаниях стандартов, конкретная схема пространственных данных, разрабатываемая для данного круга задач, отличается тем, что она содержит те классы, атрибуты, отношения, которые имеют значение в исследуемой предметной области. С учетом вышеизложенного, при разработке модели планетных данных для описания геодезических и картографических результатов обработки ДДЗ планет и спутников в качестве исходной основы для формирования метаданных выбраны стандарты FGDC и PDS4. Отдельные элементы выбранных стандартов интегрированы в схему данных при ее проектировании.

Разработка модели лунных данных.

Одна из первых обобщенных концептуальных моделей планетных данных была предложена при разработке первых ГИС небесных тел для картографирования внеземных территорий [14]. Рост количества ДДЗ небесных тел и необходимость организации пространственных данных для целей планетной картографии на основе унифицированного подхода привели к созданию подробных логических моделей, например, работы немецких исследователей [15], в которых предложена схема планетных данных, предназначенная для геологического картографирования небесных тел [16], однако, эта модель не была реализована практически.

Целью моделирования, выполненного в данной работе, является проектирование схемы данных для описания результатов обработки ДДЗ планет и спутников, с возможностью представления в виде различных тематических карт поверхности. Реализация разработанной схемы данных (физическая модель) в виде базы геоданных (БГД) на примере выбранного небесного тела (Луны) является составной частью создаваемой системы хранения планетных данных (рис. 1). Назначением схемы данных как логической модели БГД является оптимизация управления и стандартизированное описание пространственной информации, полученной по результатам тематической обработки ДДЗ Луны и картографирования лунной поверхности на разных уровнях детальности.

В набор пространственных классов для

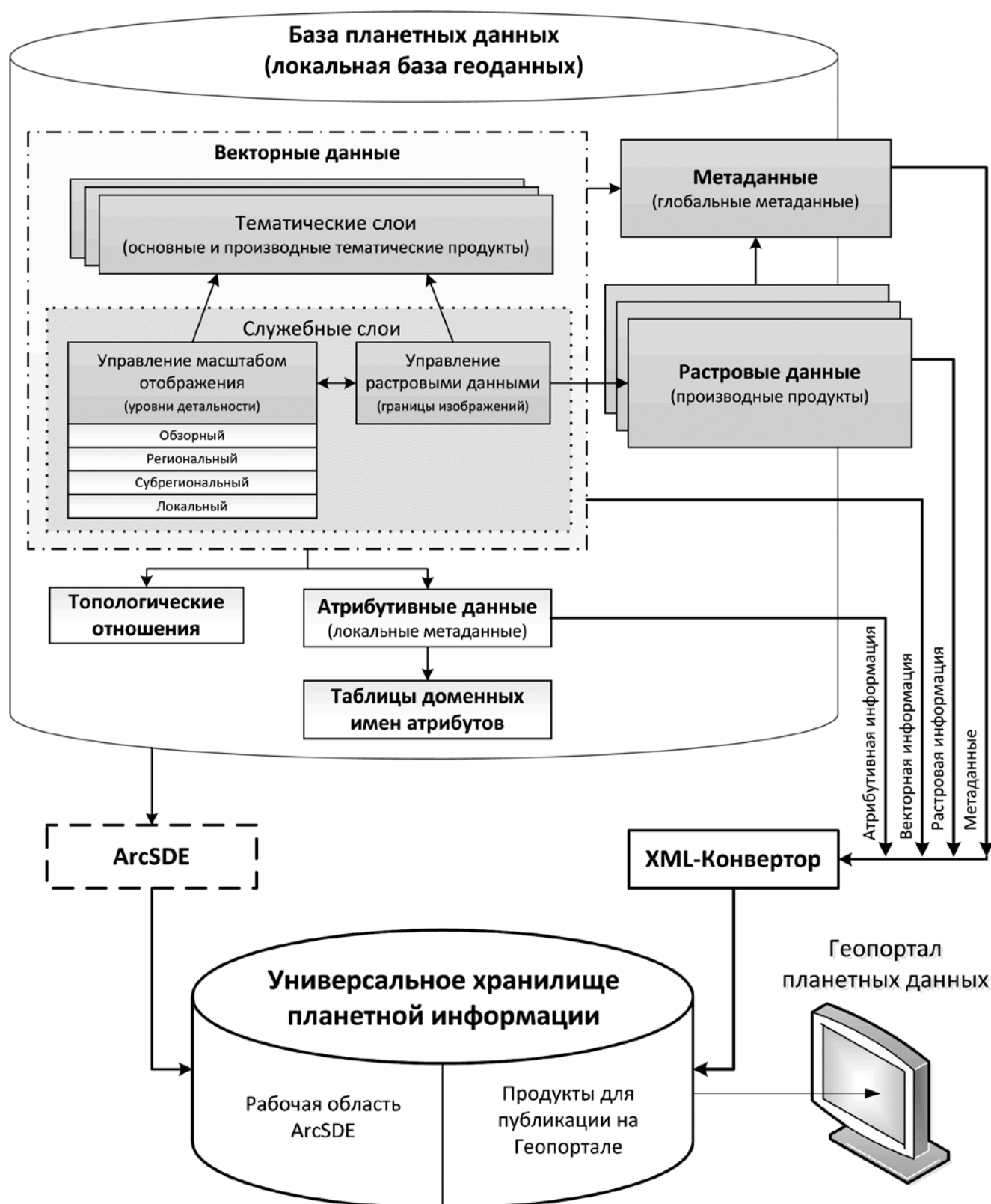


Рис. 1. Основные элементы и связи модели планетных данных, реализуемые в локальной БГД для организации доступа к информационному хранилищу с результатами исследований

исследования поверхности выбранного небесного тела (рис. 2) могут входить совокупности объектов, объединенных по общему тематическому признаку и охвату, представленных как в векторном, так и в растровом формате. Однако, поскольку для управления растровыми и векторными объектами используется различная функциональность БГД, они рассматриваются как разные типы классов, например, отдельные ортоизображения поверхности, формирующие единое покрытие в рамках общего простран-

ственного охвата исследуемой территории, или каталоги объектов рельефа, представляемые в векторном виде.

Метаданные, которые используются для поиска планетных данных, можно подразделить на глобальные и локальные метаданные. Глобальные метаданные обеспечивают общее описание объектов, объединенных в наборы тематических классов (слоев), тогда как локальные метаданные формируют описание конкретного объекта в составе слоя.

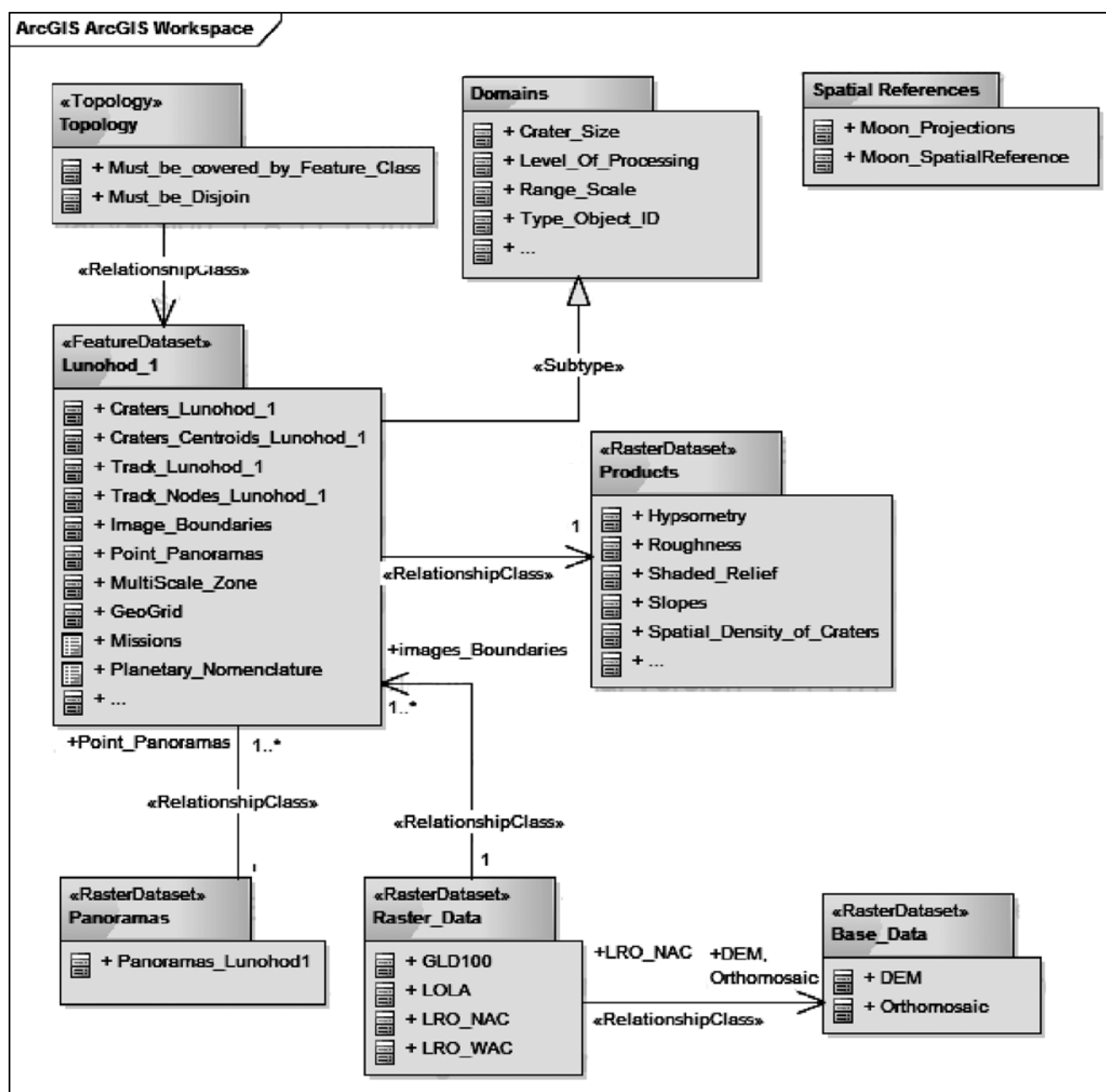


Рис. 2. Фрагмент модели лунных данных на тестовый участок: набор классов на район передвижения Лунохода-1

Основные и вспомогательные элементы БГД

Наименование	Тип
Классы пространственных объектов (векторные слои)	Главный
Растровая информация	Главный
Глобальные метаданные	Служебный
Атрибутивная информация слоя (локальные метаданные)	Главный
Топологические описания	Служебный
Домены	Служебный

В состав глобальных метаданных включены общие элементы описания набора классов, такие как используемые системы координат и проекции, назначение; ключевые слова, характеризующие предметную область; название территории исследования согласно планетной номенклатуре и др.

В состав локальных метаданных входит информация с описанием конкретных свойств каждого класса, входящего в набор данных, например, на рис. 3 представлены атрибуты класса «Кратеры» с описанием структуры каталога малых кратеров на территорию действия Лунохода-1, включая информацию о геометрическом типе пространственных объектов (полигоны) и их атрибутах (размер, глубина, координаты).

Модель дает возможность управления данными, описывая свойства используемых координатных систем, координатную точность, разрешение данных, набор классов, топологические отношения, домены. Эти функции реализуются в БГД через служебную информацию — набор мета-таблиц, которые используются для расширения свойств пространственных классов, моделирования их пространственных отношений, добавляя особенности «поведения» объектов, улучшая поддержку целостности данных и расширяя возможности управления ими [17].

Другим важным элементом модели планетных данных является поддержка многомасштабности, т.е. возможность управления представлением объектов на разных уровнях детальности — от глобального до локального:

обзорный уровень: масштаб мельче 1:5 000 000. Территориальный охват — вся поверхность Луны;

региональный уровень: предназначен для отображения протяженных областей Луны, та-

ких как приполярные территории или обширные лунные бассейны, масштаб от 1:1 000 000 до 1:5 000 000;

субрегиональный уровень: представление отдельных крупных участков поверхности Луны в масштабе от 1:100 000 до 1:1 000 000;

локальный уровень (масштаб менее 1:100 000): отображение небольших территорий, представляющих особый интерес для исследователей, включая места посадок лунных миссий (Луна-16, Луна-17, Луна-20, Луна-21, Луна-23, Луна-24) и участков передвижения советских планетоходов (Луноход-1 и -2), а также потенциальных посадочных площадок будущих миссий.

Возможность многомасштабного отображения обеспечивает реализацию картографических функций — поддержку автоматизированной генерализации: отбор векторных данных для представления больших массивов информации. Так, например, при картографировании лунной поверхности с использованием глобального каталога лунных кратеров на обзорном уровне будут показаны крупнейшие кратеры, на региональном и субрегиональном уровнях дополнительно появятся кратеры средних размеров, а на локальном уровне будут отображаться малые объекты.

Описание элементов модели планетных данных. Главным элементом модели является набор пространственных объектов (в том числе и растровые данные), управление которым осуществляется при помощи специально создаваемых служебных классов. В свою очередь, набор пространственных классов (который может расширяться) в предлагаемой модели планетных данных подразделяется на *основные* (исходная информация о поверхности планет) и *тематические* (производные продукты, полученные в результате обработки исходных данных).

К исходной информации в модели планетных данных мы относим ту, которая обеспечивает пространственное координирование объектов поверхности в трехмерном пространстве: цифровые модели рельефа (ЦМР) и ортотрансформированные космические изображения (ортотомозаики) поверхности тел. Поступление основных данных обеспечивается различными способами: либо использованием готовых про-

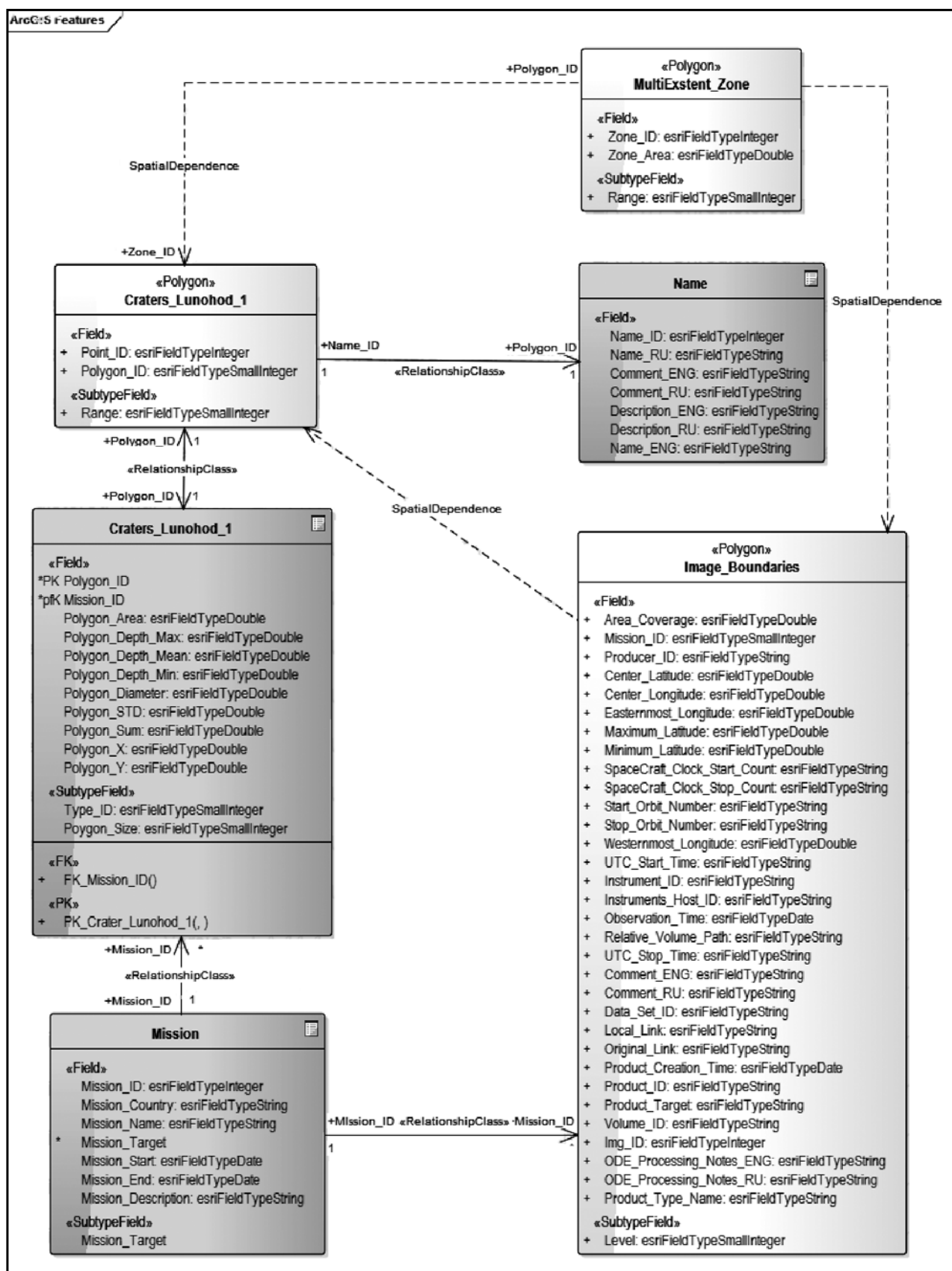


Рис. 3. Фрагмент модели пространственных планетных данных с описанием взаимосвязей между двумя классами (включая векторный слой «Кратеры» и растровые исходные изображения) и их метаданных

дуктов из архивов национальных космических агентств (NASA, ESA, JAXA), либо выполнением фотограмметрической обработки исходных орбитальных съемок различных космических миссий.

Основой для изучения характеристик поверхности небесных тел являются данные, получаемые научными приборами, установленными на борту космических аппаратов. За время исследований Луны собран значительный объем данных различных съемочных камер, установленных на разных космических аппаратах (КА), доступ к которым в современных условиях обеспечивается через интернет. Для создания лунной модели источниками современной информации являются следующие веб-ресурсы, обеспечивающие пользователей основными данными на глобальном, региональном и субрегиональном уровнях:

доступ к орбитальным лунным данным [18, 19];

доступ к данным лазерного альтиметра LOLA, установленного на борту КА LRO [20, 21];

доступ к результатам обработки дистанционного зондирования Луны (Lunar Mapping and Modelling Portal) [22];

данные дистанционного зондирования поверхности Луны японским КА SELENE (Kaguya) [23].

Глобальные каталоги кратеров Луны, созданные по новейшим данным КА LRO [24], а также по материалам предыдущих лунных миссий [25], также отнесены к основным классам пространственных объектов. Кроме того, для формирования основных классов объектов на детальном уровне использованы результаты фотограмметрической обработки (ЦМР и ортомозаики высокого разрешения — 1–5 м/пиксель), полученные в МИИГАиК в рамках подготовки координатного обоснования исследований Луны [26] на различные участки лунной поверхности [27, 28] как на основе данных современных КА, так и с использованием результатов новой обработки архивных лунных панорам [29].

К тематическим данным относятся различные производные продукты, полученные по результатам исследований лунной поверхности: уклоны; топографическая шероховатость [30]; тематические карты [31]; геоморфологи-

ческие и морфометрические каталоги объектов рельефа: кратеры, камни, борозды [32, 33].

На рис. 2, 3 представлены элементы модели планетных данных с описанием пространственной информации на участок Луны — район передвижения Лунохода-1, выбранный в качестве тестового вследствие большого количества исследований и разных типов разнородных данных. Модель содержит описание набора классов пространственных объектов и их атрибутов (см. рис. 2). Атрибутивная информация с конкретными характеристиками классов является важнейшим элементом модели (см. рис. 3). Помимо описания классов пространственных объектов и их атрибутов модель содержит системную или *служебную* информацию, которая описывает определения, правила и отношения наборов данных, обеспечивая выполнение вспомогательных функций, например, таких как поддержка топологии и доменов.

Под топологией в ГИС понимают определение пространственных взаимосвязей между объектами в одном или нескольких классах объектов. К топологическим параметрам относятся такие характеристики как пространственная связность, смежность, совпадение, вложенность и др. Поддержка этих видов топологии обеспечивает проверку взаимного положения векторных данных, что может быть важно при геологическом картографировании Луны [34].

В созданной модели лунных данных топологические правила используются для управления многомасштабностью. Важной топологической функцией является также проверка на пространственную уникальность объектов класса с целью выявления ошибок при вводе (оцифровке), которые могут повлиять на качество хранения и поиска информации в базе геоданных. Кроме того, в модели реализована работа с таблицей классификаторов доменных имен, что позволяет не только ускорить работу с большими массивами данных, но и облегчает редактирование атрибутивной информации.

Функциональность базы геоданных позволяет использовать при проектировании модели различные возможности объектно-ориентированного подхода, такие как наследование, полиморфизм, инкапсуляцию и т.п. Применение

этих возможностей, например, наследование свойств по типу «родитель-ребенок» обеспечивает сохранение связей с исходными источниками данных, таких как системы хранения национальных космических агентств NASA, JAXA, ESA или информационные хранилища научных и образовательных учреждений.

С целью расширения функциональности системы в дальнейшем предполагается применение базы геоданных ArcSDE [17] для многопользовательского редактирования пространственной информации непосредственно в системе хранения (рис.1). Помимо поддержки полной информационной модели преимуществ базы геоданных ArcSDE связаны с возможностями распределенного многопользовательского управления пространственной информацией. Другое направление развития — разработка разнообразного инструментария веб-сервисов для поддержки конечного пользователя при доступе к информационному содержанию системы хранения, для чего применяются различные методы [35].

Для загрузки данных в систему используется специально разработанный XML-конвертор, который обеспечивает представление и чтение метаданных на основе языка XML — Extensible Markup Language [36], поддерживаемый многими приложениями, включая ArcGIS 10.*. При проектировании модели формирование ее XML-структуры [37] осуществлялось с помощью специализированного программного обеспечения Sparx Systems™ [38], которое позволяет визуализировать схему данных с указанием пространственных, логических и топологических связей между классами (см. рис. 2, 3).

Особенностью формируемой системы является то, что созданная функциональность может быть диверсифицирована и применена для хранения результатов обработки данных дистанционного зондирования Земли. Возможность комплексирования в рамках единой системы результатов тематической обработки ДДЗ Земли и планет, полученных на основе геодезических и картографических методов, открывает широкие возможности для решения задач сравнительно-планетологических исследований.

Заключение. Для формирования информационной системы создана модель лунных

данных, которая практически реализована на примере результатов детальных исследований участка лунной поверхности в районе передвижения Лунохода-1 (см. рис. 2, 3). Созданная схема данных обеспечивает возможность автоматизированного управления и эффективную организацию доступа к планетной информации на разных масштабах. В настоящий момент в систему хранения загружены данные на участок действия Лунохода-1 (советская лунная миссия Луна-17), и на основе разработанной модели планируется сформировать описание результатов исследований на территорию Лунохода-2 (Луна-21). Модель лунных данных будет расширяться путем добавления дополнительных классов с новыми свойствами, например, для исследования малых вулканических образований, которые являются предметом актуальных геоморфологических лунных исследований [39], возможность проведения которых обеспечивают морфометрические методы [28], основанные на создании детальных ЦМР по данным высокого разрешения КА LRO [40].

Работа выполнена в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00197).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карачевцева И.П., Матвеев Е.Н., Коханов А.А., Козлова Н.А., Гаров А.С. Разработка системы хранения планетных данных и организация доступа к ним на основе ГИС-технологий (Геоportal) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса, 2013, Т.10. № 4. С. 89–97. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t4/89-97.pdf.
2. <http://cartsrv.mexlab.ru/geoportal/>.
3. Shingareva K.B., Leonenko S.M. Specialized planetary cartography data base. ISPRS WG IV/9: Extraterrestrial Mapping Workshop «Advances in Planetary Mapping 2003», Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA, 2003.
4. Zelenyi L. Russian Lunar Space Program, The 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, 2–10 August 2014.
5. ISO 19115:2003 – Geographic information. Metadata.
6. Бездушный А.А., Бездушный А.Н., Серебряков В.А., Филиппов В.И. Интеграция метаданных Единого научного информационного пространства РАН. –М.: Вычислительный центр РАН, 2006. –238 с.
7. INSPIRE Metadata Implementing Rules: Technical Guidelines based on EN ISO 19115 and EN ISO 19119.
8. Federal Geographic Data Committee <http://www.fgdc.gov/index.html>.
9. Кошкарёв А.В. Нормативная правовая база и стандарты европейской программы INSPIRE как основа ИПД. М.: Институт географии РАН, 2012.
10. <http://inspire-geoportal.ec.europa.eu/>
11. Crichton D. PDS4: Developing the Next Generation Planetary

Data System // Planetary Data Workshop, USA, Flagstaff, June, 2012.

12. Heather D.J., Barthelemy M., Manaud N., Martinez S., Szumlas M., Vazquez J.L., Osuna P. and the PSA development team. ESA's planetary science archive: status, activities and plans. EPSC Abstracts Vol. 8, EPSC2013-626, 2013.

13. Rodionov D. ExoMars: Overview of scientific programme. The 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, 2–10 August 2014.

14. Cherepanova E., Leonenko S., Karachevtseva I., Shingareva K. GIS «The Solar System Planets» - Case Study of the ArcGIS Planet Data Model // International Cartographic Conference, 2005.

15. Gasselt S. van, A. Nass. Planetary mapping - The datamodel's perspective and GIS framework // Planetary and Space Science 59 (2011) 1231-1242.

16. Nass. A., van Gasselt S. A Framework for Planetary Mapping. In Cartography from Pole to Pole. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pp. 261-270. 2014, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

17. <http://www.esri.com/>.

18. <http://ode.rsl.wustl.edu/moon/indextools.aspx>.

19. http://wms.lroc.asu.edu/lroc/rdr_product_select.

20. <http://imbrium.mit.edu/LOLA.html>.

21. http://pds-geosciences.wustl.edu/lro/lro-lola-3-rdr-v1/lrolol_1xxx/.

22. http://pub.lmmp.nasa.gov/LMMPUI/LMMP_CLIENT/LMMP.html#.

23. <http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/>.

24. Head III J.W., C.I. Fassett, S.J. Kadish, D.E. Smith, M.T. Zuber, G.A. Neumann, E. Mazarico. Global Distribution of Large Lunar Craters: Implications for Resurfacing and Impactor Populations. Science 329, 1504-1507 (2010); DOI: 10.1126/science.1195050.

25. Родионова Ж.Ф., Карлов А.А., Скобелева Т.П., Конопотская Е.В., Шевченко В.В., Козубский К.Э., Дехтярева К.И., Смолякова Т.Ф., Тишик Л.И., Федорова Е.А. (под общ. ред. Шевченко В.В.) Морфологический каталог кратеров Луны. –М.: Изд-во МГУ, 1987. –173 с.

26. Zubarev A., I. Nadezhdina, N. Kozlova, I. Karachevtseva, J. Oberst, M. Robinson «High-resolution terrain models from LRO stereo images for Luna-Glob landing site selection» The Third Moscow Solar System Symposium (3M-S3), Space Research Institute, Moscow, Russia, October 8–12, 2012. <http://ms2012.cosmos.ru/sites/ms2012.cosmos.ru/files/3m-s3-abstracts.pdf>.

27. Karachevtseva I., Oberst J., Scholten F., Konopikhin A., Shingareva K., Cherepanova E., Gusakova E., Haase I., Peters O., Plescia J., Robinson M. Cartography of the Lunokhod-1 Landing Site and Traverse from LRO Image and Stereo Topographic Data. 2013 Elsevier, Planetary and Space Science, Vol.85, p. 175–187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2013.06.002>.

28. Basilevsky A.T., Kreslavsky M.A., Karachevtseva I.P., Gusakova E.N. Morphometry of small impact craters in the Lunokhod-1 and Lunokhod-2 study areas. Elsevier, Planetary and Space Science 92, 2014, pp. 77-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2013.12.016>.

29. Козлова Н.А., Карачевцева И.П., Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Конопихин А.А., Коханов А.А., Патратий В.Д., Гаров А.С., Абдрахимов А.М., Оберст Ю. Новая цифровая обработ-

ка архивных лунных панорам для целей крупномасштабного картографирования и геоморфологического анализа поверхности Луны // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». –2014. –№ 2, –С. 11–19.

30. Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П., Матвеев Е.В. Картографирование топографической расчлененности поверхности Луны на основе глобальной цифровой модели рельефа GLD100 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, –2013. Т.10. –№ 4. –С. 136–153.

31. Карачевцева И.П., Конопихин А.А., Шингарева К.Б., Черепанова Е.В., Гусакова Е.Н., Баскакова М.А. Атлас Лунохода-1: геоинформационное картографирование и анализ региона посадки автоматической межпланетной станции «Луна-17» по данным дистанционного зондирования спутника Lunar Reconnaissance Orbiter // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. –Т.9. –№ 4. –С. 292–303.

32. Abdrahimov A.M., Basilevsky A.T., Karachevtseva I.P. Geological review of Lunokhod 1 area. The Fourth Moscow Solar System Symposium (4M-S3), IKI RAS, Moscow, Russia, 14-18 October 2013.

33. Козлова Н.А., Зубарев А.Э., Карачевцева И.П., Конопихин А.А., Коханов А.А., Надеждина И.Е., Патратий В.Д. Исследование поверхности Луны на разных уровнях детальности с использованием геоморфологического каталога кратеров / 34 Пленум Геоморфологической Комиссии РАН по научной проблеме «Экзогенные рельефообразующие процессы: результаты исследований в России и странах СНГ», Волгоград, 7-10 октября 2014.

34. Ivanov M.A., Hiesinger H., Abdrahimov A.M., Basilevsky A.T., Head J.W., Pasckert J.-H., Bauch K., C. van der Bogert. Landing site selection for Luna-Glob mission in crater Boguslawsky. Moscow, SMS3-MN-19, 2014. - p.56 - 57.

35. Лубнин Д.С. Открытые платформы для публикации пространственных данных в Интернет //Сборник материалов «IX Международные научный конгресс «ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2013», Новосибирск, 2013.

36. ISO 19139:2007 - Geographic information – Metadata - XML schema implementation.

37. XML Schema of the Geodatabase. ESRI, 2008. http://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao/XML_Schema_of_Geodatabase.pdf.

38. <http://www.sparxsystems.com/products/ea/index.html>

39. Braden S. E., Stopar J. D., Robinson M. S., Lawrence S. J., C. H. van der Bogert, Hiesinger H. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years // Nature Geoscience, October, 2014, doi:10.1038/ngeo2252, <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/full/ngeo2252.html>.

40. Зубарев А.Э., Козлова Н.А., Надеждина И.Е., Патратий В.Д. Обработка и анализ ДДЗ для исследования посадок советских аппаратов Луна-17, 21 / Геоморфология и картография: Сб. материалов XXXIII Пленума Геоморфологической комиссии РАН, Саратов: Издательство Саратовского университета.

Принята к печати 1 сентября 2014 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Профессор, кандидат физ.-мат. наук **Ю.Г. Веревокин**,
 профессор, доктор техн. наук **Ю.А. Ильин**, профессор, доктор техн. наук **В.А. Малинников**,
 кандидат техн. наук **Н.Е. Престон**

Московский государственный университет геодезии и картографии

ilin_ya@mail.ru

Аннотация. Представленные в работе математические модели удовлетворительно описывают дневной ход термодинамической и яркостной температур разных типов подстилающей поверхности, что делает целесообразным их использование при моделировании тепловых изображений. Показана методика такого моделирования для заданного момента времени. Описанным методом можно давать прогноз среднестатистической динамики теплового поля земных ландшафтов на базе двух снимков: одного оптического и одного в тепловом инфракрасном диапазоне. Представлены результаты такого моделирования.

Ключевые слова: математические модели, термодинамическая и яркостная температура, тепловые поля, инфракрасное изображение

Abstract. For different types of underlying surfaces, the presented mathematical models satisfactorily describe daytime variation of thermodynamic and brightness temperatures and, therefore, are suitable for modeling thermal images. A method for such modelling for a specific moment is shown. The method is suitable for forecasting thermal field dynamics of a terrestrial landscape by using a pair of its infrared and optical images along with average statistical meteorological data. Two forecast-following thermal images are presented as an example.

Keywords: mathematical models, thermodynamic and brightness temperature, thermal fields, infrared image

Съемка в тепловом ИК - диапазоне позволяет получить распределение яркостной температуры подстилающей поверхности, что дает возможность оценивать контрасты между ее различными типами. Имея значения коэффициента излучения поверхности, можно также определить и ее термодинамическую температуру. Наиболее существенным фактором, определяющим термодинамическую температуру поверхности, является величина приходящего солнечного излучения, которая имеет выраженный дневной ход. Вследствие этого и яркостная и термодинамическая температуры ведут себя схожим образом. Если широта точки наблюдения φ и дата проведения исследований известны, то прогнозировать дневной ход термодинамической и яркостной температур различных типов подстилающей поверхности позволяют математические модели [1]. Согласно одной из этих моделей изменение термодинамической температуры среды $\Delta T_s(t')$ в зависимости от безразмерного времени $t' = \frac{4t}{t_a}$ имеет следующий вид:

$$\Delta T_s(t') = T_{sc} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{\sqrt{\pi} P_1}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t'}{P_1^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{t'}}{P_1}\right) \right] (\sin \varphi \sin \beta - P_2) + \cos \varphi \cos \beta \cos\left(\frac{\pi}{2}(t' - t'_0)\right) C(\sqrt{t'}) + \\ & + \cos \varphi \cos \beta \sin\left(\frac{\pi}{2}(t' - t'_0)\right) S(\sqrt{t'}) - \\ & - \cos \varphi \cos \beta \sqrt{\pi} P_1 \int_0^{\frac{\sqrt{t'}}{P_1}} \cos\left(\frac{\pi}{2}(t' - t'_0 - P_1^2 \xi^2)\right) \exp(\xi^2) \operatorname{erfc}(\xi) \xi d\xi, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $t_a = 24$ ч; t'_0 — безразмерная продолжительность половины светлого времени суток; β — склонение Солнца.

Таким образом, помимо указанных величин, термодинамическая температура поверхности $T_s(t) = T_0 + \Delta T_s$ в произвольный момент времени t определяется своим значением в момент восхода Солнца T_0 и тремя параметрами T_{sc} , P_1 , P_2 , которые характеризуют рассматриваемую подстилающую поверхность и метеосостояние. Конкретный вид этих параметров для поверхностей как

оголенных, так и покрытых растительностью приведен в [1]. Там же даны выражения для функций $C(x)$ и $S(x)$.

Если термодинамическая температура поверхности T_s известна, то при отсутствии облачности ее яркостная температура T_{br} находится путем решения уравнения [1]:

$$B(T_{br}) = \{H_1\delta + \delta_b(1 - H_1)[1 + H_1(1 - \delta)]\} \times \\ \times B(T_s) + H_1^2(1 - \delta)B(T_A), \quad (2)$$

где $B(T)$ — спектральная яркость черного тела при термодинамической температуре T ; T_A — яркостная температура атмосферы; δ и $\delta_b \approx 0,97$ — соответственно коэффициенты излучения рассматриваемой поверхности и биомассы в инфракрасном диапазоне; H_1 — функция пропускания длинноволнового излучения растительным покровом (значения H_1 для растительного покрова разной густоты приведены в [1], а при отсутствии растительности $H_1 = 1$).

Последовательное применение моделей (1) и (2) для расчета дневного хода яркостной температуры оголенной почвы или той же почвы, покрытой травой, и асфальта [1] продемонстрировало не только качественное, но и хорошее количественное соответствие результатам натурных измерений [2]. Тем не менее, это не гарантирует пригодность уравнения (1) для нахождения термодинамической температуры воды, поскольку при его получении предполагалось, что теплоперенос в подповерхностной среде имеет чисто молекулярную природу. По этой же причине параметр «тепловая инерция» $I_T = \sqrt{\lambda \rho c}$, входящий в качестве множителя в выражения для T_{sc} и P_1 [1], в котором λ , ρ и c — соответственно коэффициент молекулярной теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость среды, применительно к воде не имеет смысла. Следовательно, решить вопрос о допустимости использования (1) в случае воды можно только эмпирически, попытавшись подобрать такие параметры в (1), которые обеспечивали бы соответствие расчетных и экспериментальных данных. Как обычно, здесь это делается путем подбора параметра I_T , который при данных обстоятельствах называется кажущейся тепловой инерцией.

Для подбора используются экспериментальные данные о дневном ходе яркостной

температуры воды в спектральном диапазоне 10,2–10,7 мкм [2], а в качестве δ_Σ берутся значения суммарного коэффициента поглощения прямого и рассеянного солнечного излучения метровым слоем воды, соответствующие типам 1 и 9 прибрежных вод по классификации Ерлова [3]: 0,63 и 0,824. При этом, как и в [1], используется не графическая экспериментальная информация из [2], а таблицы, предоставленные авторами указанной работы. Кроме того, при нанесении экспериментальных точек учитывался сдвиг между декретным временем (в работе [2]) и поясным временем, используемым в данных расчетах, который составляет два часа. Результаты представлены на рис. 1. При моделировании задавалась средняя скорость ветра $u = 2$ м/с, которая типична для погожей солнечной погоды в районе г. Шеки (Азербайджан), где проводился эксперимент. Кроме того, при данной скорости ветра удовлетворительно описывается дневное изменение яркостной температуры не только воды (см. рис. 1), но и почвы, как оголенной, так и покрытой травой, а также асфальта [1]. Для четырех рассмотренных образцов подстилающей поверхности экспериментальные данные, полученные в одно и то же время в одном и том же месте, хорошо согласуются с результатами расчетов вблизи и после достижения максимальных значений температуры. Заметное количественное различие измеренных и рассчитанных значений яркостной температуры в утренние часы, по-видимому, обусловлено

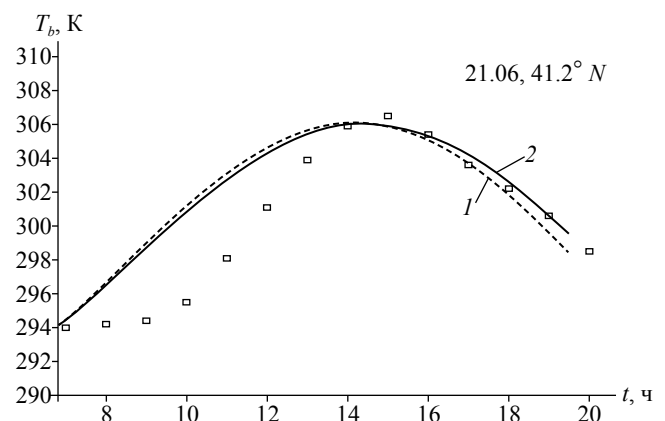


Рис. 1. Результаты моделирования (—) и измерений (□ □ □) яркостной температуры воды в безоблачную погоду:

1 — $\delta_\Sigma = 0,63$, $I_T = 4200$ Дж/(м² с^{1/2} К);
2 — $\delta_\Sigma = 0,824$, $I_T = 6500$, Дж/(м² с^{1/2} К)

нестабильностью метеоусловий во время проведения измерений.

Представленные результаты показывают, что математические модели (1), (2) удовлетворительно описывают дневной ход термодинамической и яркостной температур разных типов подстилающей поверхности, что делает целесообразным их использование при моделировании тепловых изображений. Более того, поскольку для большинства объектов природной среды коэффициент излучения в ИК-диапазоне близок к единице, то различие термодинамической и яркостной температур в основном значительно меньше амплитуды изменения этих температур в течение суток. Поэтому, в первом приближении, при создании моделируемых тепловых изображений можно ограничиться моделью (1), которая имеет всего три параметра: T_{sc} , P_1 и P_2 .

Если коэффициент излучения δ какого-нибудь участка заметно отличается от единицы, то для него средняя термодинамическая температура находится путем решения уравнения (2), в противном случае она считается равной яркостной температуре, найденной с помощью снимка.

При наличии оптического снимка для создания моделируемого изображения на основе уравнений (1), (2) нужно знать широту рассматриваемого участка подстилающей поверхности, дату, прозрачность атмосферы, скорость ветра, теплофизические характеристики выбранных объектов и их температуры T_0 в момент восхода Солнца, а также характеристики растительности при ее наличии. Прозрачность атмосферы, скорость ветра и T_0 можно характеризовать их среднестатистическими значениями, типичными для рассматриваемого промежутка времени в данной местности; типы участков подстилающей поверхности, а значит, их теплофизические характеристики, можно определить с помощью снимка; а растительность можно характеризовать значением листового индекса [1], типичным для данной даты. В результате, для каждого участка подстилающей поверхности рассчитываются параметры T_{sc} , P_1 , P_2 и определяется зависимость $T_s(t) = T_0 + \Delta T_s(t)$, необходимая для расчета яркостной температуры (2) и создания теплового изображения в заданный момент времени, ко-

торое, в данном случае, будет иметь среднестатистический характер.

Наличие, наряду с оптическим снимком, ИК-снимка позволяет для каждого участка подстилающей поверхности рассчитать T_0 , входящую в выражение для P_2 , а значит, сделать моделируемое изображение более конкретным. В этом случае, при известном времени получения снимка, решается преобразованное интегральное уравнение (1), где искомое значение T_0 вычисляется, например, методами нахождения нулей функции одной переменной в программном пакете Matlab [1]. Средняя для каждого участка яркостная температура вычисляется с использованием значений пикселей на исходном ИК-снимке [4]. Так, для снимков со спутниковой системы Landsat 5 поверхностная яркостная температура T_{br} вычислялась по значениям пикселей теплового ИК-изображения (DN):

$$T_{br} = k_1 / \ln(1 + k_2 / R_{TM}),$$

где k_1 , k_2 — калибровочные константы, $k_1 = 1260,56$ К; $k_2 = 60,766$ мВт см⁻² ср⁻¹ мкм⁻¹; R_{TM} — спектральная интенсивность излучения, измеренная сенсором.

Величину R_{TM} можно получить, используя значения пикселей DN теплового изображения с помощью формулы

$$R_{TM} = \frac{DN}{255} (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min},$$

где $R_{\max}$ и $R_{\min}$ — соответственно максимальное и минимальное значения спектральной интенсивности излучения, определенные сенсором.

Данная методика была использована для моделирования тепловых изображений, характерных для околополуденных моментов времени, на базе снимков, сделанных в утренние часы, при условии, что скорость ветра была равной нулю. Изменение во времени термодинамической температуры наиболее характерных объектов, представленных на снимках, показано на рис. 2. Ход графиков показывает, что контраст температуры между различными типами поверхности достигает максимального значения в интервале 12–15 ч, т.е. тепловое изображение, полученное в это время, должно быть более контрастным.

На рис. 3, представлены результаты такого моделирования. На рис. 3, а дан ИК-снимок городской застройки (Краснодарский край)

с координатами по широте $43,6-45,6^\circ$, долготы $37,8-40,8^\circ$, полученный 29.08.2010 г. в 07,57 мск со спутниковой системы Landsat 5. Моделированное изображение данного участка для 13 ч дано на рис. 3, б. При моделировании широта принималась равной 45° , тепловая инерция воды — $2000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ с}^{1/2} \text{ К})$, городской застройки (кирпич) — $650 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ с}^{1/2} \text{ К})$, почвы — $800 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ с}^{1/2} \text{ К})$.

На рис. 4, а дан ИК-снимок береговой зоны острова Новая Земля, полученный той же системой 27.06.2006 г. в 07,15 мск для широты $74-76,9^\circ$ и долготы $57,1-67^\circ$. Моделировалось изображение (рис. 4, б) для 14 ч, широта принималась равной 75° , тепловая инерция воды $2000 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ с}^{1/2} \text{ К})$, льда — $2073 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ с}^{1/2} \text{ К})$, почвы — $800 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ с}^{1/2} \text{ К})$. Как и предполагалось, полученные изображения являются не только более контрастными, на них выделяются новые тепловые неоднородности, незаметные на снимках, сделанных в утренние часы.

Описанным выше методом можно давать прогноз среднестатистической динамики теплового поля земных ландшафтов на базе двух снимков: одного оптического и одного ИК. Однако наличие нескольких ИК-снимков одного и того же участка подстилающей поверхности, сделанных в разное время в течение одного дня, позволяет реконструировать изменение яркостных температур объектов, расположенных на данном участке, для любого момента времени в течение этого же дня. Действительно, как уже говорилось, в первом приближении дневное изменение яркостной температуры можно рассчитывать с помощью уравнения (1), которое описывает дневной ход термодинамической температуры и примени-

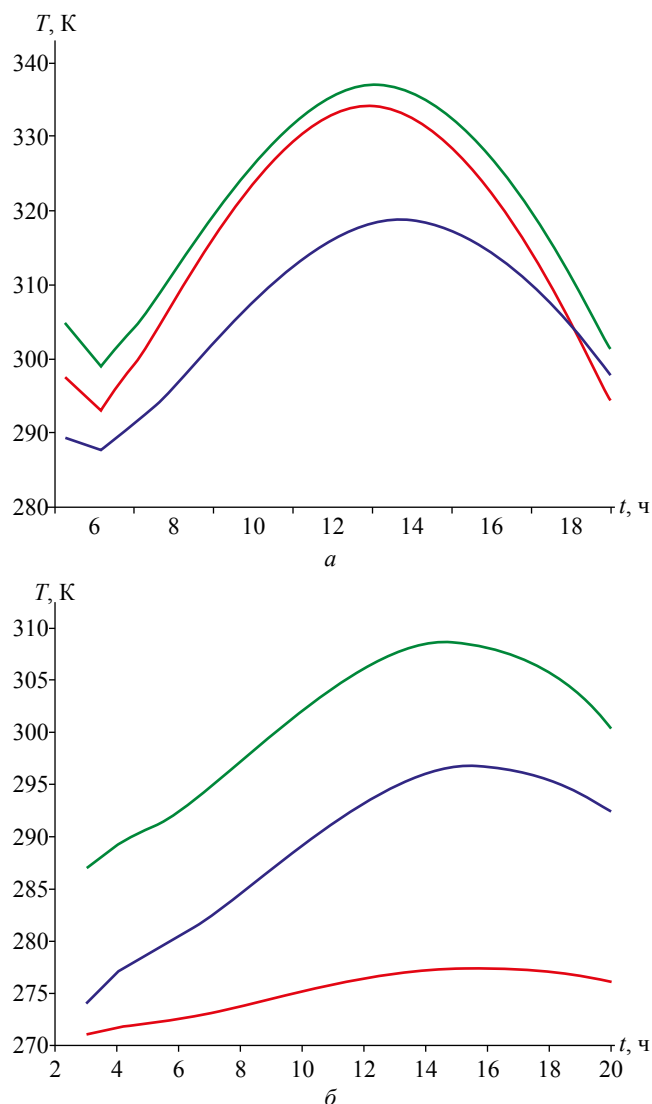


Рис. 2. Дневной ход термодинамической температуры для объектов:

а — вода; почва; городская застройка;
 б — вода; почва; лед

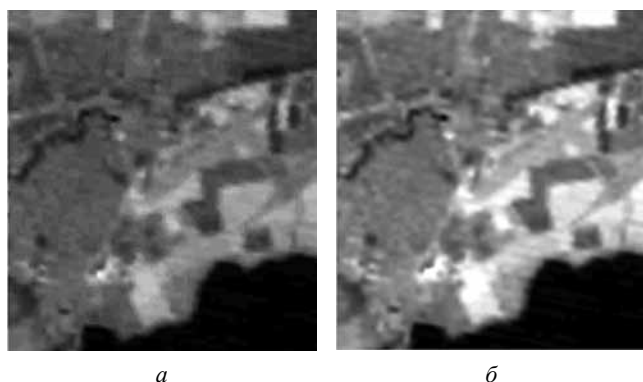


Рис. 3. Исходный тепловой ИК-снимок в 8 ч (а); моделируемая тепловая картина в 13 ч (б)

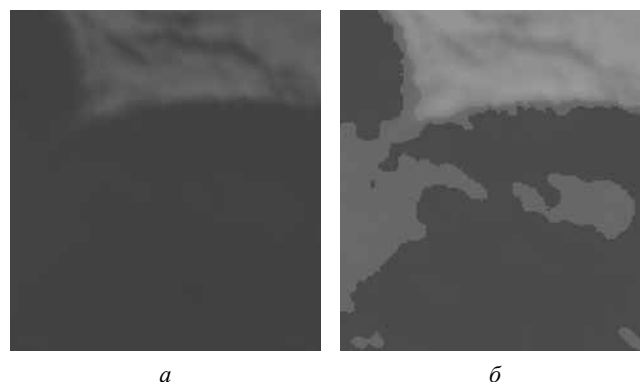


Рис. 4. Исходный тепловой ИК-снимок в 7 ч (а); моделируемая тепловая картина в 14 ч (б)

мо не только в случае безоблачной погоды, но также и при наличии сплошной облачности [5]. Ясно, что трехпараметрическую структуру (1) функция $\Delta T_s(t)$ будет иметь и при переменной облачности. Для нахождения трех параметров достаточно иметь три уравнения, то есть три ИК-снимка, а чтобы для каждого объекта, представленного на снимке, рассчитать T_0 — нужен четвертый снимок. Нахождение параметров из системы интегральных уравнений не является простой задачей, но она решается. Полученное таким образом модельное тепловое изображение будет реальным даже при отсутствии информации и о теплофизических свойствах, представленных на нем объектов, и о метеоусловиях, если последние в течение дня оставались стабильными.

Проведенные исследования показали, что на основе оптического и одного или нескольких тепловых ИК-изображений можно прогнозировать тепловую картину подстилающей поверхности для различных моментов времени суток. Для околополуденных интервалов вре-

мени контрасты между объектами будут усилены, что позволит выделять слабоконтрастные объекты. Анализируя зависимость моделируемого изображения от времени, можно выбрать наиболее оптимальный интервал тепловой ИК-съемки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веревошкин Ю.Г., Ильин Ю.А. Влияние растительности на контраст яркостной температуры подстилающей поверхности в дальней ИК-области // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2013. — №6. — С. 44–49.
2. Ильин Ю.А., Скорохватов Н.А. Результаты натурных регистраций яркостной температуры образцов подстилающей поверхности в спектральном диапазоне 10,2–10,7 мкм // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования 4-8.12.2006. М. 2006. — Т.2. — С. 123–124.
3. Ерлов Н.Г. Оптика моря. — Лен.: Гидрометеиздат, 1980.
4. Ильин Ю.А., Чуфарова Н.Е. Комплексный анализ тепловых ИК изображений земной поверхности // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2011 г. — № 2. — С. 37–40.
5. Веревошкин Ю.Г., Ильин Ю.А. Неоднородность поля яркостной температуры земной поверхности в дальней ИК-области спектра при наличии облачности // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2008. — №4. — С. 51–55.

Принята к печати 11 декабря 2013 г.
Рекомендована кафедрой физики МИИГАиК.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ НАВОДНЕНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Профессор, кандидат техн. наук **И.А. Миртова**, студент **Т.М. Фатехов**
Московский государственный университет геодезии и картографии
Mirtova.ira@yandex.ru

Аннотация. Приводятся результаты анализа динамики наводнения в 2013 г. по материалам дистанционного зондирования Земли на территорию Хабаровского края, а также методика автоматизированного дешифрирования.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, наводнения, дистанционное зондирование Земли, автоматизированное дешифрирование

Abstract. The article represents both the results of the analysis of the dynamics of a flood in 2013 based on remote sensing of Khabarovsk region territory and methods of automated interpretation.

Keywords: emergencies, floods, remote sensing, automated interpretation

Наводнение является одним из самых разрушительных природных явлений, происходящих на поверхности Земли. Наводнение — значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в реке во время половодья или паводка; при заторе; зажоре; из-за интенсивных дождей; при быстром таянии снега; ветровых нагонах и приливных явлениях в устье реки; при прорыве гидротехнических сооружений и вследствие других причин [1].

Риск возникновения чрезвычайных ситуа-

ций, вызванных наводнениями, в стране очень высок. Это исторически обусловлено расположением значительной части населенных пунктов, объектов экономики и сельскохозяйственных земель на прибрежных территориях в долинах рек, часто ниже критических отметок затопления местности. Каждый год наводнения наносят ущерб населенным пунктам, дорогам и сельскохозяйственным угодьям, выражающийся в больших людских потерях и огромном уроне для экономики в целом.

В России суммарная площадь земель, подвергающихся наводнениям, оценивается в 350–450 тыс. км². В многоводные годы общая площадь затопляемых территорий достигает 2–2,5% площади страны. Наводнения в России происходят ежегодно, а в некоторых районах — по несколько раз в год. Под угрозой затопления в стране находится более 700 городов, тысячи населенных пунктов, сотни тысяч гектаров сельскохозяйственных угодий. Наибольшим размахом характеризуются наводнения в Южном и Дальневосточном федеральных округах. Эти опасные процессы повторяются здесь особенно часто, охватывают большие территории, приносят огромные разрушения [1].

В конце июля 2013 г. юг Дальнего Востока России оказался подверженным катастрофическому наводнению, вызванному интенсивными затяжными осадками, что привело к последовательному увеличению уровня воды в реке Амур. Наиболее пострадавшими регионами стали Амурская область, Еврейская автономная область и Хабаровский край. По состоянию на 14 сентября в Хабаровском крае было подтоплено 77 населенных пунктов в 9 муниципальных образованиях, более 3000 жилых домов с населением около 35 000 человек. Также наводнением были затоплены территории 3 869 приусадебных и 3 762 дачных участков. В ходе эвакуационных мероприятий была оказана помощь 13 688 людям [2].

Использование данных дистанционного зондирования Земли становится неотъемлемой частью при мониторинге крупных природных чрезвычайных ситуаций, в том числе и наводнений. Анализ космических снимков позволяет не только объективно оценивать масштабы и нанесенный ущерб, но и повысить достоверность прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

Оперативная спутниковая съемка местности и своевременный анализ затопленной территории, изменения уровня воды, а также масштабов бедствия является одной из основных задач при мониторинге наводнений [1]. Космическая информация позволяет не только наблюдать развитие паводка или половодья, но и получать оперативный прогноз зон затопления, оценивать принесенный ущерб, решать

задачи выбора защитных дамб для сдерживания наводнения, выявлять участки, которым еще угрожает затопление.

В ходе исследования предварительно были изучены физико-географические особенности района и проведен анализ существующих данных по дешифрированию наводнений в Дальневосточном федеральном округе на примере спутникового мониторинга паводковой обстановки в Приамурье и оценки площади пострадавших в результате наводнения на Дальнем Востоке 2013 г. сельскохозяйственных земель по материалам дистанционного зондирования.

Цель данного исследования: анализ динамики наводнения как чрезвычайной ситуации по данным дистанционного зондирования Земли на территорию Дальневосточного федерального округа (в границах Хабаровского края).

К климатическим особенностям Дальнего Востока относится то, что наряду с муссонной циркуляцией воздуха летом имеет место и циклоническая деятельность, характеризующаяся прохождением над территорией бассейна атмосферных фронтов, с которыми связаны обильные осадки. Поэтому лето характеризуется умеренно теплой погодой, средняя температура июля составляет $+16 \div +22^\circ$. За теплый период выпадает до 90–95% годовой суммы осадков, из них более половины — с июля по сентябрь. По территории они распределяются неравномерно, максимальное количество — на востоке и северо-востоке, где горы наиболее высоки [3]. Резкие переходы от зимы к лету вызывают в начале теплого сезона интенсивное таяние мерзлоты. Когда насыщение почвы влагой достигает предельных значений, осадки переходят в поверхностный сток. Это способствует интенсивному подъему воды в реках, что нередко приводит к затоплению прибрежных территорий.

Для водного режима рек Дальнего Востока характерно:

сравнительно невысокое весеннее половодье, мощные летние паводки от ливневых осадков и исключительно низкая зимняя межень;

основное питание (около 70%) реки района получают за счет летних дождей ливневого ха-

рактера; снеговое питание играет второстепенную роль, а грунтовое — при наличии вечной мерзлоты является исключительно бедным;

между весенним половодьем и летними паводками в июне иногда наблюдается кратковременная межень, но большей частью паводки следуют непосредственно за весенними подъемами. Число летних дождевых паводков различно и колеблется от 4 до 6 и более за летний сезон. Наиболее высокие паводки, вызывающие иногда катастрофические наводнения, наблюдаются чаще всего в конце июля—начале августа.

Кроме того, сильно расчлененный рельеф и наличие вечной мерзлоты благоприятствуют быстрому стоку поверхностных вод. Максимальный сток на реках наблюдается во время прохождения ливней. Максимумы, формирующиеся весной за счет снеготаяния, по своим размерам обычно значительно уступают летним паводкам.

Данные дистанционного зондирования Земли широко применяются для изучения водных ресурсов суши [4].

Космический снимок дает пространственную картину состояния водного объекта (реки, озера, водохранилища) на всем его протяжении. Последовательные съемки позволяют проследить изменение этой картины во времени и пространстве. С помощью космических снимков можно оценивать площадь затопления речных пойм, картографировать границы разливов, отслеживать динамику волны половодья. Спектрональная съемка позволяет выделить воды с различными механическими, химическими и оптическими свойствами, что особенно важно при анализе динамики наводнений [4].

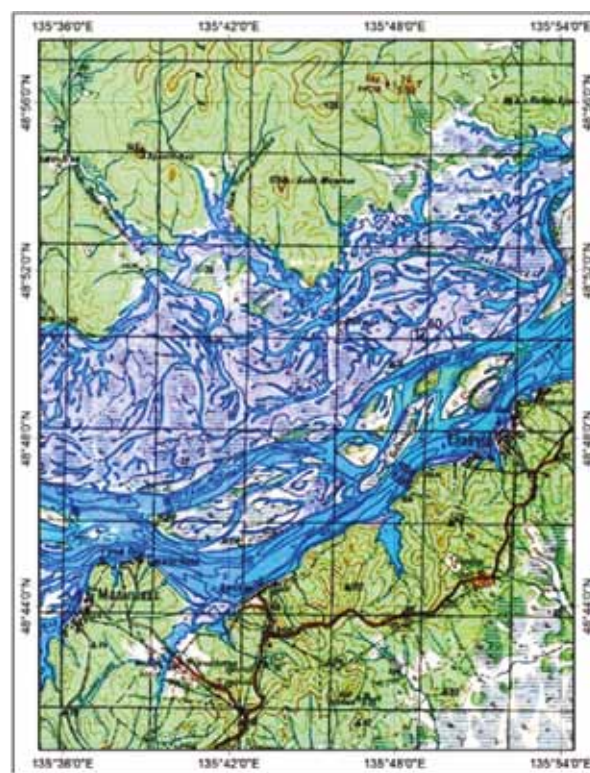
Федеральным Государственным Бюджетным Учреждением Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ НИЦ «Планета») был проведен мониторинг паводковой ситуации во время наводнения 2013 г. на Дальнем Востоке [4].

Один из примеров изображения показан на рис. 1 [5].

Для оценки площади земель сельскохозяйственного назначения, пострадавших в резуль-



а



б

Рис. 1. Пойменные разливы р. Амур и ее притоков, Хабаровский край:

а — цветосинтезированное изображение; б — совмещение затопленных площадей пойм рек, выделенных на спутниковом изображении, с топографической картой масштаба 1:200 000 (серым цветом показаны затопленные участки пойм рек)

тате наводнения на Дальнем Востоке в 2013 г. ФГБУ «Россельхозмониторинг» были проанализированы материалы данных дистанционного зондирования среднего разрешения (данные спутника Landsat-8). Результатом стало выделение сельхозугодий, пострадавших в результате наводнения на субъекты Дальневосточного федерального округа: Амурскую область; Еврейскую автономную область; Хабаровский и Приморский край; Магаданскую область (рис.2) [6].

При анализе существующих данных по дешифрированию наводнений в Дальневосточном федеральном округе на примере спутникового мониторинга паводковой обстановки в Приамурье и оценки площади пострадавших в результате наводнения на Дальнем Востоке 2013 г. сельскохозяйственных земель по материалам дистанционного зондирования, можно сделать следующие выводы:

полученные в результате тематические изображения представляют большой интерес для конечных потребителей: административных органов власти, организаций по защите гражданского населения, страховых компаний;

по представленным данным довольно сложно извлечь информацию о методике;

представленные материалы проблематично использовать для анализа чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнениями и паводками, происходящими на других территориях;

представляет также интерес разработка содержания карт динамики по материалам ДЗЗ, которые позволили бы определять площади, географические координаты затопленных и незатопленных участков суши, прогнозировать последствия наводнений и разработать эффективные меры противодействия негативным последствиям.

В данном исследовании были использованы следующие исходные материалы.

1. Космические снимки на июнь и сентябрь 2013 г. на территорию Хабаровского края, полученные со спутника дистанционного зондирования Земли Landsat 8. Спутник Landsat 8 получает данные, используя два набора инструментов: Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Первый набор получает изображения в девяти диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излу-

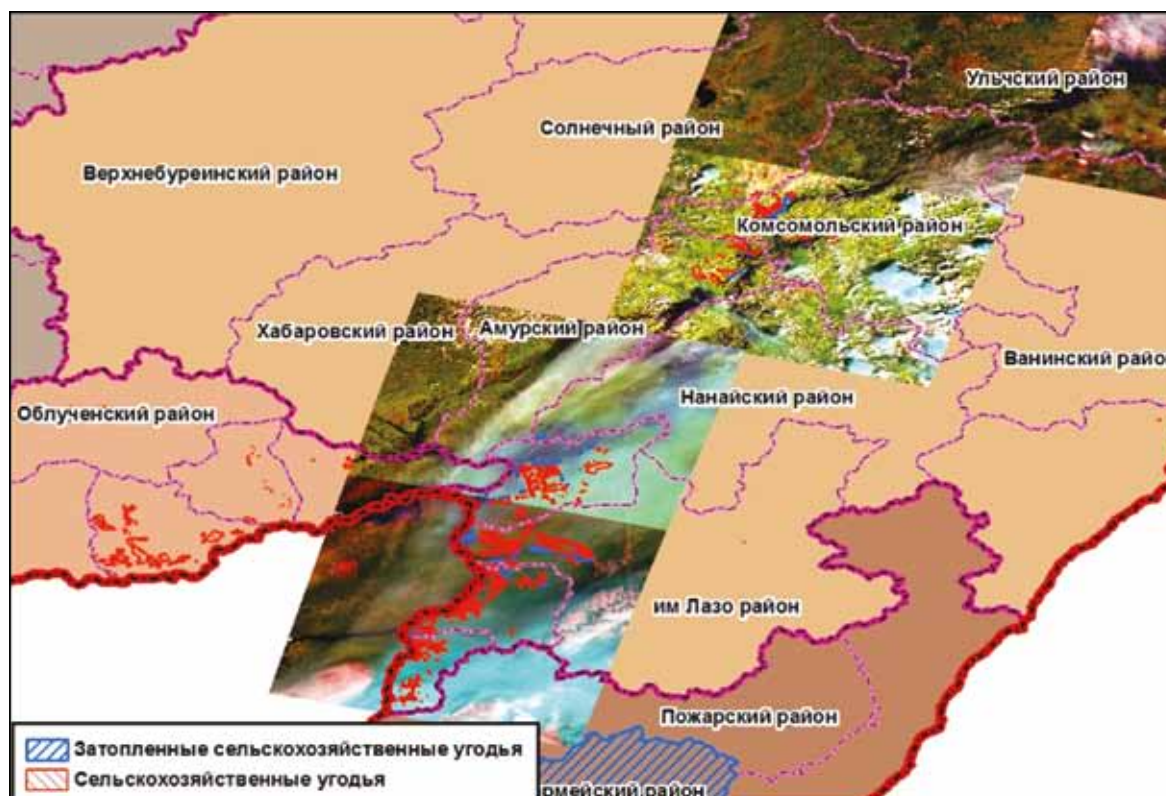


Рис. 2. Пострадавшие от наводнения сельскохозяйственные угодья. Общая картина по Хабаровскому краю

чения (ИК), второй набор — в двух диапазонах дальнего (теплого) ИК.

2. Топографические карты на территорию Дальневосточного федерального округа различных масштабов: 1:200 000 и 1:500 000.

3. Различные методические пособия, литературные источники и Интернет-ресурсы.

Для обработки данных дистанционного зондирования был использован растровый графический и программный продукт Erdas Imagine 8.4. Для обзора и определения покрытия снимками территории была использована программа Google Earth. Для анализа динамики наводнения р. Амур на Дальнем Востоке в 2013 г. (в границах Хабаровского края) и выявления площадей затопленных участков было выполнено автоматизированное дешифрирование космических снимков Landsat 8 с пространственным разрешением 30 м.

Предлагаемая методика использует цифровой метод обработки спутниковых данных с применением различий в спектральных характеристиках природных объектов. Дешифрирование снимков осуществлялось в ближнем инфракрасном диапазоне частот, т.к. именно в нём объекты гидрографии резко выделяются на фоне изображения других природных образований. Появляется широкая возможность автоматизированного распознавания объектов посредством математической формализации процесса дешифрирования и использования современных систем цифровой обработки изображений.

Исходные изображения различного временного ряда для пятого канала (диапазон длин волн 0,845–0,885) и шестого канала (диапазон

длин волн 1,560–1,660) показаны на рис. 3, 4.

Автоматизированное дешифрирование объектов гидрографии выполнено по снимкам с относительно высокой достоверностью с использованием подхода разметки точек изображения путём контролируемой классификации [7].

Технологическая схема состоит из следующих этапов:

выбор фрагментов космических снимков с изображением пойм и русел рек на различные даты;

импорт фрагмента после предварительной обработки и его преобразование в системе ERDAS IMAGINE в формат img;

подготовка изображений к тематической обработке;

выполнение процедуры контролируемой классификации;

формирование тематического изображения для создания карты динамики.

По разработанной технологической схеме анализа динамики наводнений проведена обработка спутниковых данных для выявления затопленных участков поймы р. Амур и оценки площадей затопления.

Методика анализа динамики наводнений в данном исследовании заключается в следующем.

На первом этапе производится выделение объектов гидрографии по исходному изображению в ближнем ИК-диапазоне путём выделения тестовых участков и последующим проведением контролируемой классификации гиперпараллелепипедным методом. В результате получены тематические изображения конкретных объектов: речной акватории и при-

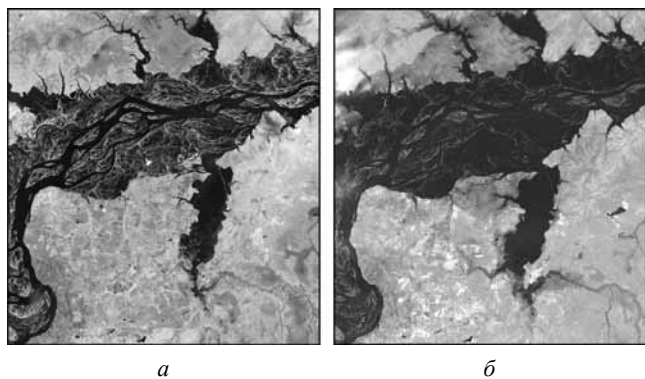


Рис. 3. Исходные изображения (диапазон длин волн 0,845 – 0,885 мкм):

a — 7 июня 2013 г.; *б* — 27 сентября 2013 г.

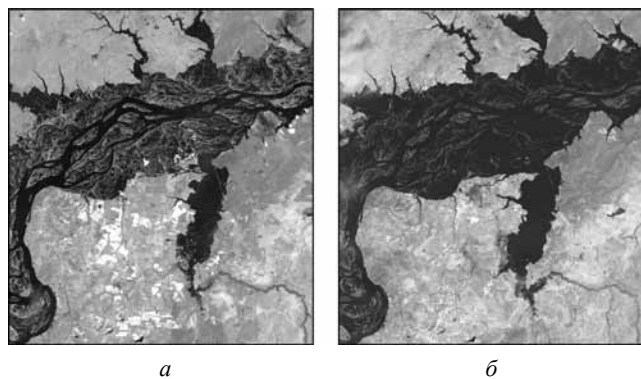


Рис. 4. Исходные изображения (диапазон длин волн 1,560 – 1,660 мкм):

a — 7 июня 2013 г.; *б* — 27 сентября 2013 г.

легающей к ней суши — прибрежной территории, включающей участки пойм. При этом осуществляется подбор «нижнего» и «верхнего» порога значений пикселей для выделения русла р. Амур и затопленных участков поймы.

На втором этапе производится изменение цвета растрового изображения, полученного в результате классификации. Белым цветом выделяются участки суши, голубым — водные поверхности и затопленные участки поймы реки. В редакторе атрибутов раstra изменяется значение непрозрачности для участков суши (ей присваивается значение 1), так как в данном случае суша является фоном. Таким образом, суша становится видимой на изображении.

На следующем этапе производится выделение речной акватории, за исключением водных поверхностей вне бассейна речной системы, то есть выделяются только те участки, которые оказались затопленными в результате наводнения. Выделение таких участков производится с помощью обработки бинарного изображения речной акватории методом наращивания однородных областей изображения. Начальный пиксель устанавливается в любой точке, относящейся к водной поверхности русла. При этом подбираются значения предельного евклидова расстояния в пространстве признаков между точками. В результате выделяются русло реки и затопленные из-за наводнения участки.

В ходе такой работы получается тематическое изображение, на котором представлены два класса объектов: поверхность суши и объекты гидрографии; русло р. Амур и затопленные участки поймы. Результат обработки

исследуемого временного ряда изображений показан на рис. 5, 6. На рис. 7 приведены условные обозначения выделяемых классов объектов.

По результатам разновременного автоматизированного дешифрирования можно визуально проследить динамику выделенных объектов и получить информацию о площади, занимаемой тем или иным классом объектов. При этом площади определяются в автоматическом режиме (таблица).

Площади затопленных участков

Дата съемки	Диапазон съемки, мкм	Площади объектов гидрографии, га	Площади затопленных участков поймы, га
7 июня	0,845–0,885	94123,1	41633,9
27 сентября	0,845–0,885	135757	
7 июня	1,560–1,660	89350,3	39549,7
27 сентября	1,560–1,660	128900	

По разнице площадей гидрографии разновременных тематических изображений можно судить о масштабах наводнения, оценивать их динамику. Площади затопленных участков для пятого канала ближнего инфракрасного диапазона оказались равными 41 633,9 га, для шестого канала — 39 549,7 га. При этом площади затопленных участков немного отличаются друг от друга в силу различия в спектральных отражательных характеристиках водной поверхности в разных диапазонах съемки.

По отношению к общей площади рассматриваемой территории — 35 7628 га — площади затопленных участков составляют соответственно 11,6% (для пятого канала) и 11,1%

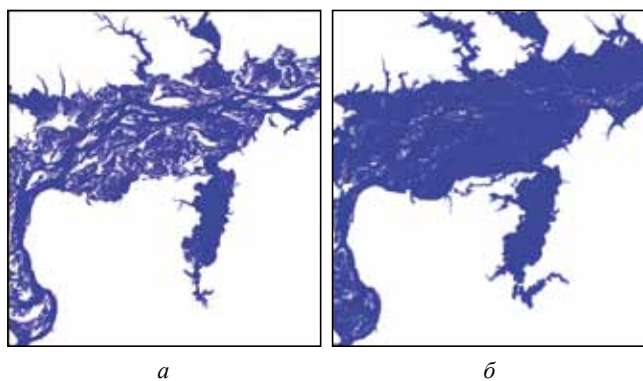


Рис. 5. Тематическое изображение затопленных участков (диапазон длин волн 0,845 – 0,885 мкм):
а — 7 июня 2013 г.; б — 27 сентября 2013 г.

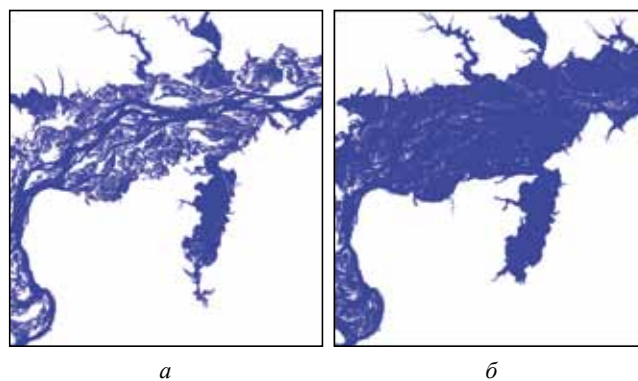


Рис. 6. Тематическое изображение затопленных участков (диапазон длин волн 1,560 – 1,660 мкм):
а — 7 июня 2013 г.; б — 27 сентября 2013 г.

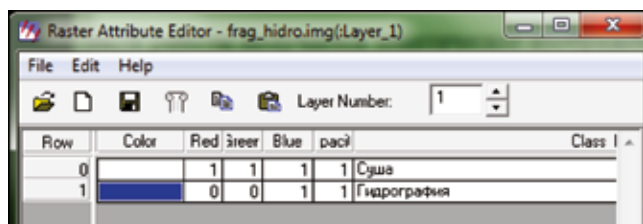


Рис. 7. Условные обозначения классов выделенных объектов (суша, гидрография)

(для шестого канала). Это свидетельствует о высокой степени затопления поймы во время наводнений и паводков.

Полученную информацию можно использовать для прогнозирования наводнений, оценки и ликвидации их последствий.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №13-05-00534, 2013 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации / Под общей

ред. С.К. Шойгу. – М.: Феория, 2011. – С. 422–438.

2. Гаркин А.С., Коренюк И.Ю., Казачинская С.А. Наводнение-2013. – Талакан, 2014. – 144 с.

3. Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. – М.: Мысль, 1978. – 512 с.

4. Сайт Федерального Государственного Бюджетного Учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета») [Электронный ресурс] // Об организации. – Режим доступа: <http://planet.iitp.ru/index1.html> - Загл. с экрана.

5. Сайт Росгидромета [Электронный ресурс]. Пресс-центр // Спутниковый мониторинг паводковой обстановки в Приамурье. – Режим доступа: <http://www.meteorf.ru/press/news/4844/> - Загл. с экрана.

6. Официальный интернет-портал Российского центра государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения [Электронный ресурс]. Оценка площади земель сельскохозяйственного назначения, пострадавших в результате наводнения на Дальнем Востоке в 2013г. – Режим доступа: <http://rosagroland.ru/news/189/> - Загл. с экрана.

7. Марчуков В.С., Гусев М.Н., Гусева И.М. Методика исследований динамики речных островов по многозональным космическим снимкам (на примере рек Амур и Зея) // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2013. – №1. – С. 54–58.

Принята к печати 9 сентября 2014 г.

Рекомендована кафедрой космического мониторинга МИИГАиК.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИУСЛОВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Профессор, кандидат техн. наук. **Е.К. Никольский**, доцент, кандидат техн. наук. **А.М. Тарарин**

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

amtararin@gmail.com

Аннотация. Описывается применение методов геоинформационного анализа для исследования опасности затопления приустьевых территорий. Определение количественных характеристик произошло по зонам затопления, полученным по космическим снимкам высокого пространственного разрешения и цифровой модели рельефа, представленной в виде грида. В результате определены зависимости площади затопления от уровня воды для различных участков реки. Произведено сравнение ширины разлива при уровнях воды различной обеспеченности и сравнение средних абсолютных отметок на участках затопления различной обеспеченности. Определены объемы воды зон затопления при различных уровнях затопления.

Ключевые слова: зоны затопления, геоинформационный анализ, данные дистанционного зондирования Земли

Abstract. The application of geoinformational analysis methods for investigation of the risk of flooding riverine areas is described in the research. Quantitative characteristics were determined for the flood zones, obtained by satellite images of high spatial resolution and the digital terrain model, represented as a grid. Dependences of flood areas from water level were determined for different river sections. Overflow width was compared for different water levels, and mean absolute levels were compared for flood sections of different coverage. Volumes of water in flood zones with different levels are determined.

Keywords: inundated area, geoinformational analysis, Earth remote sensing data

Под опасностью затопления следует понимать вероятность затопления территории за определенный период времени. Риск такого затопления определяется по результатам сопоставления многолетних наблюдений за

максимальными уровнями воды на гидропостах и информации о паводкоопасных зонах. Сведения об уровне режиме рек получают с гидрологических постов. Учитывая обширность речных пойм и быстроту протекаю-

щих на них процессов затопления, актуальной задачей является составление прогнозных карт зон затопления. Традиционные методы гидродинамического моделирования, использующие в качестве исходных данных, как правило, устаревшие картографические материалы с недостаточной высотой сечения рельефа (пять и более метров), зачастую не дают адекватную картину затопления прирусловых территорий [1]. В этой связи одним из перспективных направлений исследований является разработка технологий применения дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса при мониторинге паводков и наводнений [2]. Используя разновременные космические снимки можно определить затапливаемые территории при различных уровнях воды. Так, на рис. 1 приведено изображение, полученное путем визуализации в ScanEx Image Processor каналов двух космических снимков (Landsat 7): за 11 июля 2001 г. в период летней межени и за 26 апреля 2000 г. в период пика весеннего половодья.

Определение опасности затопления территории было произведено по методике моделирования с использованием космических снимков [3, 4]. В зависимости от местоположения гидрологических постов прирусловые территории р. Волги в границах Нижегородской области были разделены на участки так, чтобы

гидрологические посты находились в середине участков. Для анализа опасности затопления территории воспользуемся двумя тестовыми участками V1 и V2. Зоны затопления при расчетных обеспеченностях уровней воды 80 и 50% были получены путем интерполяции урезов воды, векторизованных по разновременным космическим снимкам. Уровни воды расчетных обеспеченностей 25 и 10% были получены путем экстраполяции урезов воды, отвекторизованных по космическим снимкам с отображением затопления в разные периоды времени, с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) в виде грида. Изображение рельефа по способу отмывки на тестовых участках представлено на рис. 2.

Полученные по космическим снимкам и ЦМР зоны затопления изображены на рис. 3. В табл. 1 приведены уровни воды на гидрологических постах «Городец» и «Балахна» при расчетных обеспеченностях 10; 25; 50 и 80%.

Таблица 1

Уровни воды на гидропостах на участках V1 и V2

Гидропост (участок)	Уровень воды (в абсолютных отметках), м			
	80%	50%	25%	10%
Городец (V1)	70,90	71,78	72,44	73,49
Балахна (V2)	69,44	70,82	71,85	72,58



Рис. 1. Совмещенное изображение каналов двух разновременных космических снимков (красным цветом изображены затапливаемые территории)

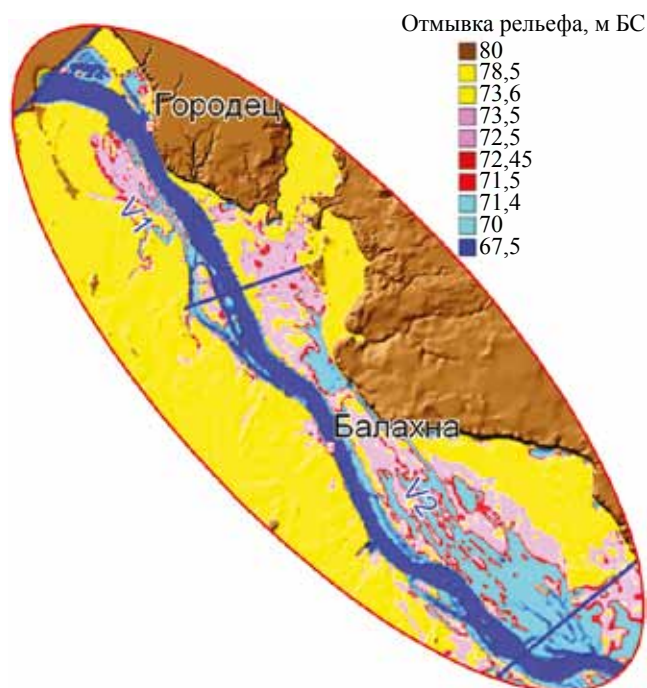


Рис. 2. Изображение рельефа по способу отмывки

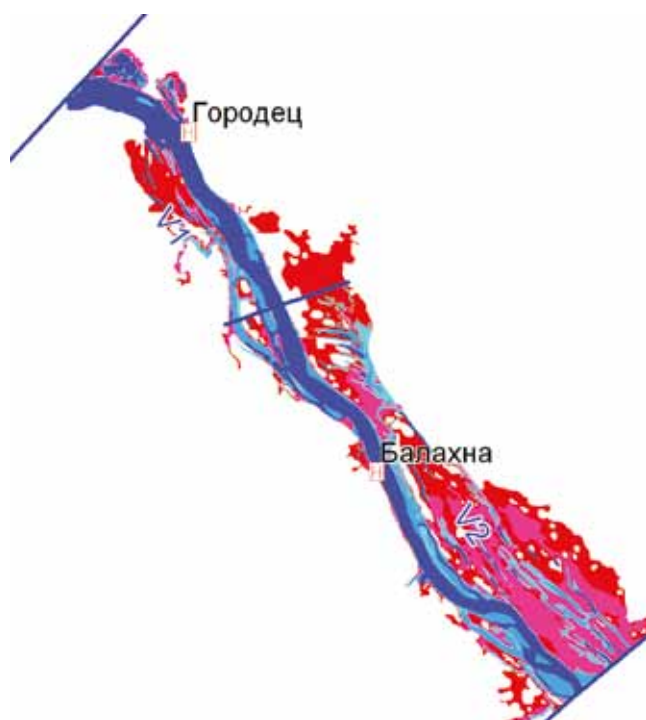


Рис. 3. Зоны затопления при максимальных уровнях воды расчетных обеспеченностей:

□ — гидрологический пост; — граница участка;
■ — зеркало воды в летний межень

Зоны затопления:

■ — 80%; ■ — 50%; ■ — 25%; ■ — 10%

При оценке опасности затопления территорий важную роль играет площадь затопления. Определение площадей затопления происходило в два этапа. На первом этапе средствами ГИС MapInfo Professional были определены площади зеркала воды при расчетных обеспеченностях 10; 25; 50 и 80%. На втором этапе были получены площади затопления путем вычитания площади зеркала воды в период летней межени из площадей зеркал воды при уровнях расчетных обеспеченностях 10; 25; 50 и 80%. Так как левобережная и правобережная части поймы могут иметь большие разли-

чия в рельефе, предлагается оценивать опасность затопления для каждой части отдельно. В табл. 2 приведены площади зеркал воды и площади затопления на участках V1 и V2, а также их левобережных (LV1 и LV2) и правобережных (RV1 и RV2) частей при расчетных обеспеченностях уровней 10; 25; 50 и 80%.

На рис. 4 представлено соотношение площадей затопляемых территорий при уровнях воды расчетных обеспеченностей 10; 25; 50 и 80% соответственно для левобережной и правобережной частей участков V1 и V2.

Для дальнейшего анализа затопляемых территорий был построен график зависимости площади затопления от уровня воды. Так, на рис. 5 можно увидеть, что кривая для участка V2 имеет более пологий наклон, чем кривая для участка V1. Если рассмотреть зависимость площади затопления от уровня воды для LV2 и RV2 частей участка V2 по отдельности, то окажется что более пологий наклон кривой участка V2 характерен, прежде всего, для его левобережной части. Такой вид кривой связан с пологим рельефом прибрежной зоны левобережья.

Количественной характеристикой опасности затопления является площадь затопления. Чем больше площадь затопления, тем выше опасность затопления. Проводя сравнение рек или нескольких участков реки между собой, необходимо учитывать их протяженность. Поэтому для оценки опасности затопления территории следует использовать приведенную ширину разлива на участке $B_{прив}$. При проведении анализа затопления для левобережной или правобережной части участка реки приведенная ширина разлива на участке будет равна отношению площади затопляемой территории $S_{зт}$ к длине участка реки L :

$$B_{прив} = S_{зт} / L. \quad (1)$$

Затопление прирусловых территорий может происходить в двух направлениях, то есть

Таблица 2

Зеркало воды и площади затопления на участках V1 и V2 при различной обеспеченности

Участок	Площадь зеркала воды, км ²					Площадь затопления, км ²			
	межень	80%	50%	25%	10%	80%	50%	25%	10%
V1	14,7	18,91	20,97	25,22	38,08	4,21	6,27	10,52	23,38
LV1	—	9,55	10,32	12,44	19,55	1,79	2,56	4,68	11,79
RV1	—	9,36	10,65	12,78	18,53	2,42	3,71	5,84	11,59
V2	16,11	27,99	58,9	66,45	96,11	11,88	42,79	50,34	80,00
LV2	—	14,14	22,52	47,72	72,83	5,99	14,37	39,57	64,68
RV2	—	13,85	36,38	18,73	23,28	5,89	28,42	10,77	15,32

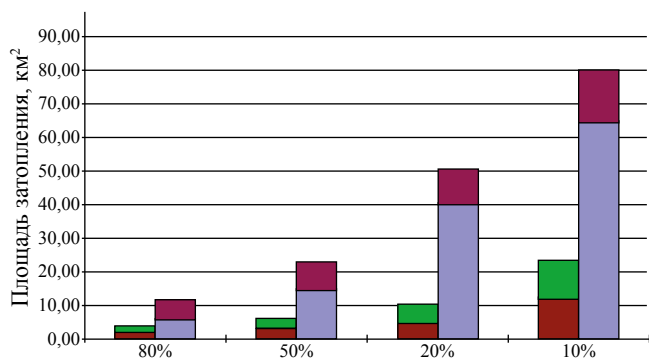


Рис. 4. Площадь затопляемых территорий при различных обеспеченностях уровней воды на левобережной и правобережной частях участков V1 и V2:
■ — RV1; ■ — LV1; ■ — RV2; ■ — LV2

для двух берегов реки. Для того чтобы сравнивать опасность затопления участка реки в целом и его левобережной и правобережной частей в отдельности предлагается для расчета приведенной ширины разлива на участке и реки в целом использовать формулу

$$B_{\text{прив}} = S'_{\text{ЗТ}} / 2L, \quad (2)$$

где $S'_{\text{ЗТ}}$ — площадь затопляемой территории (для правобережной и левобережной частей); L — длина участка реки.

Пример расчета приведенной ширины разлива при уровнях воды расчетных обеспеченностей 10; 25; 50 и 80% для участков V1 и V2 и их левобережной и правобережной частей приведен в табл. 3.

На рис. 6 можно наглядно увидеть сравнение ширины разлива для участков V1 и V2 при уровнях воды различной обеспеченности.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) участок р. Волги V2 подвержен большей опасности затопления, чем участок V1;
- 2) левобережная часть участка V2 подвержена по сравнению с правобережной большей опасности затопления, что подтверждает необ-

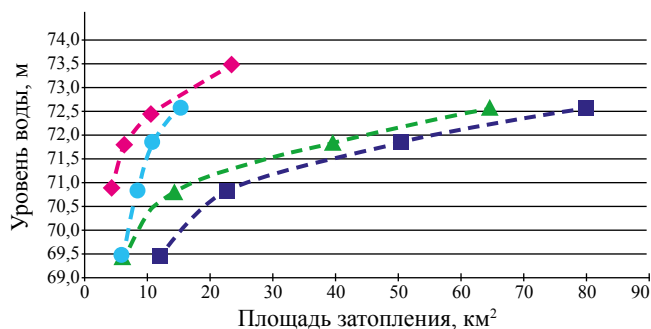


Рис. 5. Зависимость площади затопления от уровня воды для участков V1 и V2 и для левобережной (LV2) и правобережной (RV2) частей участка V2:
— V1; — V2; — LV2; — RV2

ходимость выделения правобережных и левобережных участков.

Для оценки рельефа затопляемых территорий с помощью грида средствами ГИС MapInfo Professional были определены средние абсолютные отметки территорий (табл. 4). На рис. 7 можно наглядно увидеть сравнение абсолютных отметок на разных участках затопления.

Зная значения средних абсолютных отметок на участках затопления различной обеспеченности, можно вычислить приближенный объем воды $V_{\text{ЗТ}}$ по формуле

$$V_{\text{ЗТ}} = (Y_{\text{рп}} - H_{\text{рп}}) S_{\text{ЗТ}}, \quad (3)$$

Таблица 3

Средняя ширина разлива при уровнях воды различной обеспеченности

Участок	Длина участков, км	Средняя ширина разлива, км			
		80%	50%	25%	10%
V1	13,68	0,15	0,23	0,38	0,85
LV1		0,13	0,19	0,34	0,86
RV1		0,18	0,27	0,43	0,85
V2	22,6	0,26	0,50	1,11	1,77
LV2		0,27	0,64	1,75	2,86
RV2		0,26	0,37	0,48	0,68

Таблица 4

Средние абсолютные отметки рельефа и объемы воды зон затопления на участках V1 и V2 при различной обеспеченности

Участок	Средняя абсолютная отметка, м				Объем воды, км³			
	80%	50%	25%	10%	80%	50%	25%	10%
V1	68,23	68,85	69,73	71,28	11,24	18,37	28,51	51,67
LV1	67,28	67,79	69,11	71,15	6,48	10,21	15,58	27,59
RV1	68,93	69,59	70,23	71,41	4,77	8,12	12,91	24,11
V2	67,33	68,47	69,60	70,63	25,07	53,56	113,27	156,00
LV2	68,23	69,19	69,99	70,93	7,25	23,42	73,60	106,72
RV2	66,40	67,06	68,15	69,40	17,91	31,66	39,85	48,72

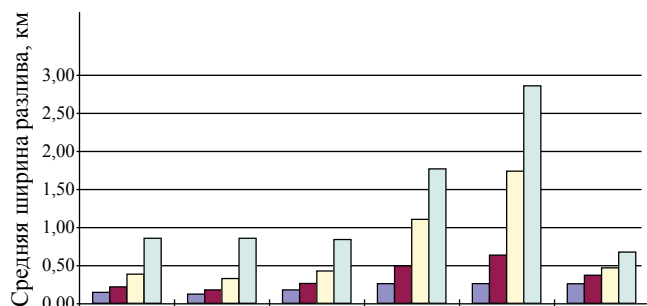


Рис. 6. Сравнение ширины разлива при уровнях воды различной обеспеченности:

■ — 80%; ■ — 50%; ■ — 25%; ■ — 10%

где U_r^{cp} — средний урез воды на участке реки; H^{cp} — средняя абсолютная отметка на затопляемой территории; $S_{\text{зт}}$ — площадь затопляемой территории.

Результаты расчетов приведены в табл. 4. В качестве среднего уреза воды на участках рек U_r^{cp} был взят расчетный уровень воды на гидропосту при соответствующих обеспеченностях (см. табл. 1). Данные об объемах воды на затопляемой территории могут быть использованы при планировании режима регулирования водохранилищ в периоды развития весенних половодий.

Таким образом, геоинформационные методы позволяют получить более полную картину опасности затопления территории и дать количественную оценку опасности затопления для каждого участка реки.

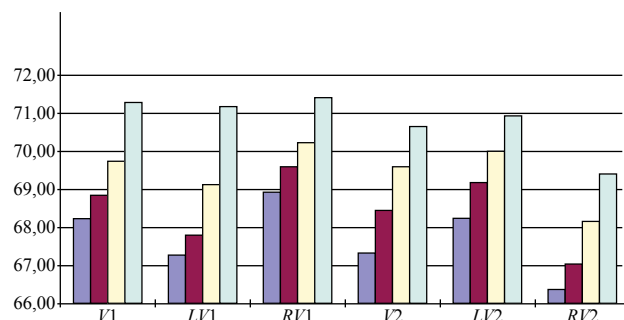


Рис. 7. Сравнение средних абсолютных отметок на участках затопления различной обеспеченности:

■ — 80%; ■ — 50%; ■ — 25%; ■ — 10%

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников В.М., Тарарин А.М. Верификация гидродинамической модели на участке реки Волги, с применением материалов дистанционного зондирования Земли из космоса // Приволжский научный журнал. — 2008. — №4. — С. 94 – 98.
2. Тарарин А.М. Опыт применения изображений Земли из космоса и ГИС-технологий для мониторинга паводков и наводнений в России / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов : сб. науч. ст. : в 2 т. - М. : ИКИ, 2007. — Вып. 4. — Т.2. — С. 340 – 344.
3. Тарарин А.М. Методика моделирования затопления территории по данным дистанционного зондирования Земли из космоса // Геодезия и картография. 2009. — №1. — С. 46 - 49.
4. Тарарин А.М. Космический мониторинг и оценка риска затопления урбанизированных территорий в периоды половодий: автореферат дис. канд. техн. наук: 25.00.36, МИИГАиК 2010.

Принята к печати 26 марта 2014 г.

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СДВИГА СПЕКТРАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ НА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ

Кандидат техн. наук Л.Н. Чабан, аспирант К.В. Берёзина

Московский государственный университет геодезии и картографии

lulichaban@mail.ru

Аннотация. Описан метод коррекции сдвига спектральной калибровки по строке гиперспектрального изображения на основе анализа локальных изменений спектральной яркости однородного растительного покрова. Приведены результаты численных экспериментов и пример коррекции предложенным методом.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, гиперспектральные изображения, спектральная калибровка, радиометрическая коррекция, спектральная яркость растительности

Abstract. The technique of correcting a spectral calibration shift along hyperspectral image line is described. The technique is based on the analysis of local changes in spectral brightness of a homogeneous vegetation canopy. The results of numerical experiments and an example of the correction are presented.

Keywords: remote sensing, hyperspectral images, spectral calibration, radiometric correction, vegetation reflectance

Среди перспективных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) все большую популярность приобретает гиперспектральная аппаратура (ГСА). ГСА формирует изображения земной поверхности в узких спектральных каналах (1–10 нм), непрерывно заполняющих рабочий диапазон спектра регистрируемого излучения. Это позволяет получать с точностью до ширины канала зависимость яркости каждого пикселя от длины волны и открывает новые перспективы решения практических задач на основе данных ДЗЗ.

Первой областью применения гиперспектральных изображений был поиск материалов и минералов по характерной форме зависимости яркости (или коэффициента отражения) от длины волны [1]. Позже гиперспектральные изображения стали широко использоваться для решения задач оценки состояния растительного покрова, в том числе для обнаружения утечек углеводородов в зонах их добычи и транспортировки [2]. Узкополосные вегетационные индексы позволяют более точно, чем по мультиспектральным изображениям, определять пигментный состав и биохимическую структуру растительной клетки [3]. Космическая гиперспектральная аппаратура также имеет большие перспективы для задач классификации и оценки состояния лесной растительности [4], что особенно актуально для территории РФ.

Конструкционные особенности ГСА, обеспечивающие высокое спектральное разрешение, требуют тщательного определения и систематического контроля ее калибровочных характеристик. Особенно большое значение имеет спектральная калибровка – определение точного положения центров и ширины спектральных каналов. Отклонение центров каналов от расчетных приводит к ошибкам при атмосферной коррекции изображений, необходимой для поиска объектов по их спектральным эталонам. Следствием этих ошибок являются ложные всплески и провалы возле полос поглощения излучения различными компонентами атмосферы [5]. Смещение центров каналов негативно влияет также на расчет узкополосных индексов и на результаты тематической классификации.

Эффекты «смайлинга». Специфической особенностью ряда конструкций ГСА является

сдвиг центров каналов вдоль строки изображения (поперек направления съемочного трека), обусловленный отклонением хода луча от расчетного. Наиболее распространенными типами таких эффектов являются «смайл-эффект» и «вращение» [6]. Общий характер изменения положения центра канала в результате этих эффектов показан на рис. 1. Все типы таких эффектов иногда называют «смайлингом» [7] из-за нелинейного характера сдвига.

Полный диапазон вариаций значения λ по строке обычно не превышает 2–2,5 нм, поэтому при тематической обработке изображений с ГСА в универсальных пакетах (ERDAS Imagine, ENVI) из калибровочных данных используются только положение центров каналов и их ширина. Однако в ряде случаев это приводит к ощутимым для тематической обработки эффектам. Наиболее сильно они проявляются на спектральных кривых растительного покрова в области «красного края», где спектральная кривая быстро растет при переходе из красного в ближний ИК-диапазон (700–740 нм). Значительные изменения соотношений спектральной яркости по каналам вызывает сдвиг спектральной калибровки и вблизи полос поглощения излучения водяным паром в диапазоне 760–900 нм. На RGB-композициях каналов из указанных диапазонов (методики отбора информативных каналов при построении RGB-композиций представлены в работе [8]), эти эффекты хорошо заметны визуально (рис. 2): переход от оранжевого к зеленовато-

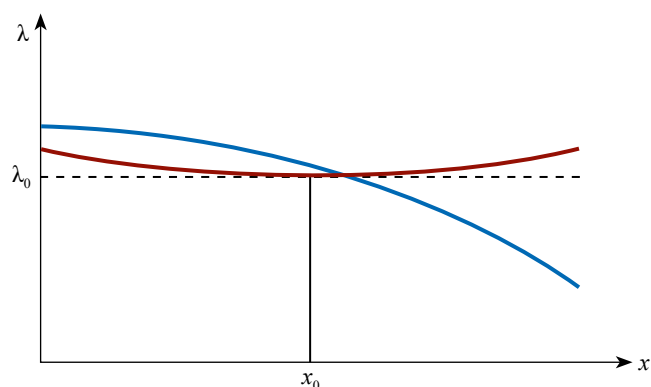
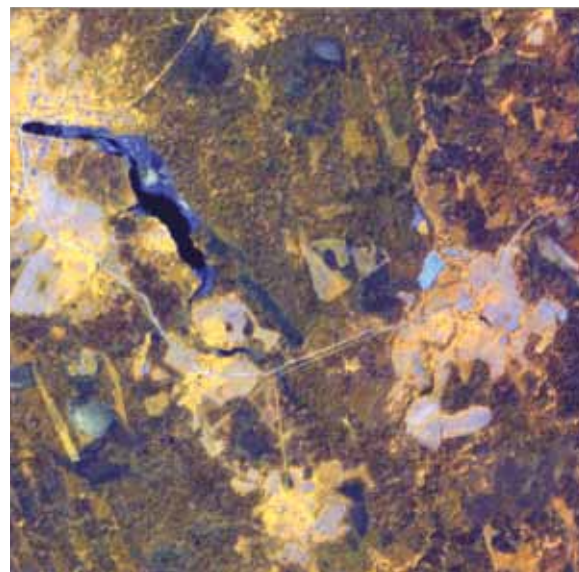


Рис. 1. Зависимость длины волны центра канала λ от координаты x пикселя по строке изображения при наличии «смайлинга»:

x_0 — центральный элемент строки; λ_0 — расчетная (паспортная) длина волны для центра канала; — — — смайл-эффект; — — — вращение



а



б

Рис. 2. Проявление сдвига каналов по строке на RGB-композициях из каналов «красного края» и ближнего ИК-диапазонов на авиационном гиперспектральном изображении (смайл-эффект) и космическом изображении Hyperion (вращение):

а — смайл-эффект; б — вращение

му оттенку в левой и правой части снимка для смайл-эффекта и красный оттенок в правой части изображения для вращения.

Спектральная калибровка с учетом «смайлинга». В обзоре [7], посвященном вопросам обработки гиперспектральных изображений с аппаратуры Hyperion, отмечается, что коррекция «смайлинга» при орбитальной калибровке космической ГСА до сих пор остается предметом исследований. Эффект учитывается только путем отдельной спектральной калибровки каждого пикселя в строке.

В методике орбитальной калибровки ГСА Hyperion [9] используются линии спектра солнца, полосы поглощения излучения различными компонентами атмосферы и полосы поглощения диффузной краски, нанесенной на внутреннюю поверхность крышки зрачка прибора. Для выполнения калибровки при определенных положениях спутника производится съемка солнца поверх атмосферы и через атмосферу, а также съемка крышки зрачка прибора, расположенной под углом 37° от закрытого положения. Однако для совмещения всех полученных спектров сначала применяется гауссова фильтрация, а затем сплайн-интерполяция спектров, что изначально вносит погрешность в определение точного положения характерных точек спектральных кривых. Кроме того,

результат зависит от адекватности и полноты используемой при расчетах модели атмосферы. Судя по виду реальных изображений в ИК-диапазоне и оценкам «смайлинга», приведенным в [7], положения центров трех каналов ИК-диапазона, определенные по методике [9], заметно завышены в правой части строки. Точность оценки положения канала составляет здесь $\pm 1,1$ нм, что негативно сказывается и на точности оценки «смайлинга».

Один из наиболее удачных методов, разработанный оптическим обществом (OSA) [5], основывается на использовании уже упомянутых ложных выбросов и провалов, возникающих при атмосферной коррекции гиперспектральных изображений. На основе одномерной оптимизационной процедуры ищется спектральный сдвиг каналов, обеспечивающий наиболее ровный спектр коэффициента отражения. Проблемным местом такой методики также является процедура атмосферной коррекции. Кроме того, в диапазоне 400–1000 нм, наиболее важном для классификации и оценки состояния растительного покрова, имеется всего одна четкая линия поглощения кислородом на длине волны около 762,5 нм. В видимом диапазоне особенности атмосферного спектра практически полностью маскируются шумами.

Исходные данные и постановка задачи.

Предлагаемый метод оценки «смайлинга» в видимом и ближнем ИК-диапазонах непосредственно использует яркостные спектры объектов отснятой сцены. Наиболее подходящим является спектр интенсивно вегетирующей густой растительности. Во-первых, растительность имеет высокую яркость в ближнем ИК-диапазоне, благодаря чему линия поглощения излучения кислородом выражена наиболее четко. Во-вторых, у такой растительности достаточно четко выражен минимум в красной зоне, соответствующий полосе поглощения излучения хлорофиллом [2]. Для однотипной здоровой растительности его положение достаточно устойчиво.

Предполагается также, что хотя бы одному пикселю в строке изображения соответствует паспортное значение центра канала, определенное в процессе предполетной калибровки. То есть мы рассматриваем исключительно эффект «смайлинга», не претендуя на оценку калибровочных характеристик в целом.

Для обоснования и апробации метода использовано изображение с аппаратуры Hyperion. Выбор обусловлен наличием канала, центр которого по паспорту довольно точно совпадает с линией поглощения излучения кислородом — 762,5 нм (канал 41). В работе [9] для этого канала приведены результаты предполетной и орбитальной калибровки, что позволяет выполнить их сопоставление с предлагаемым методом.

Изображение получено в конце мая 2012 г. на участок Центрального лесного заповедника РФ и прилегающую с севера территорию, до озера Волго включительно. Фрагмент этого изображения приведен на рис. 2. Достоинство данной территории — здоровое состояние лесной растительности и ее небогатый породный состав: доминирующей лиственной породой верхнего яруса является береза. Березовые леса характеризуются высокой отражательной способностью с ярковыраженными спектральными особенностями в видимом диапазоне, а при пространственном разрешении аппаратуры 30 м на пиксель однородны по спектральной яркости. Коэффициент отражения березы в ближнем ИК-диапазоне составляет 0,4–0,5 [4], его зависимость от длины волны здесь

монотонна, без характерных особенностей. Провалы на яркостном спектре обусловлены только поглощением излучения компонентами атмосферы.

Предлагаемый метод основан на том факте, что при сдвиге расчетного центра канала λ_0 на величину $\delta\lambda$ в коротковолновую область значение яркости $b(\lambda)$ в канале будет соответствовать длине волны $\lambda_0 + \delta\lambda$. Наоборот, при сдвиге центра канала в длинноволновую область на $\delta\lambda$ значение яркости в канале будет соответствовать $\lambda_0 - \delta\lambda$. Таким образом, определив для каждого пикселя в строке, какой длине волны соответствует его яркость $b(\lambda)$, можно рассчитать соответствующую поправку $\delta\lambda$ и определить реальное положение канала.

Расчет сдвига центров каналов в ближнем ИК-диапазоне. Яркостные спектры березы, полученные в разных точках строки (рис. 3), отличаются не только глубиной провала в канале 41 (762,5 нм по паспорту), но и соотношением яркостей в каналах 40 (752,4 нм) и 42 (772,8 нм). Именно этот эффект свидетельствует о смещении каналов и приводит при атмосферной коррекции к ложным выбросам и провалам.

Самая большая относительная глубина провала в канале 41, очевидно, должна соответствовать тому пикселю, для которого центр канала наиболее близок к паспортному значению (762,5 нм) и, соответственно, к кислородной линии. При этом положении, как можно заметить по рис. 3 (зеленый график), яркостной спектр в диапазоне 742–783 нм (39–43 каналы) монотонно и практически линейно растет. При монотонном росте спектральной яркости сдвиг реального положения канала 41 в коротковолновую область (влево) на величину $\delta\lambda$ относительно расчетного λ_0 приводит к тому, что яркость пикселя в канале 40 оказывается завышенной, а в канале 42 — заниженной. Наоборот, при сдвиге реального положения канала в длинноволновую область, заниженным оказывается значение яркости в канале 40, а в канале 42 — завышенным.

Для корректного сравнения изменений отсчетов яркости по разным участкам березы целесообразно нормировать их к яркости в канале 50 (854,2 нм), где отсутствуют полосы поглощения излучения водяным паром. Далее

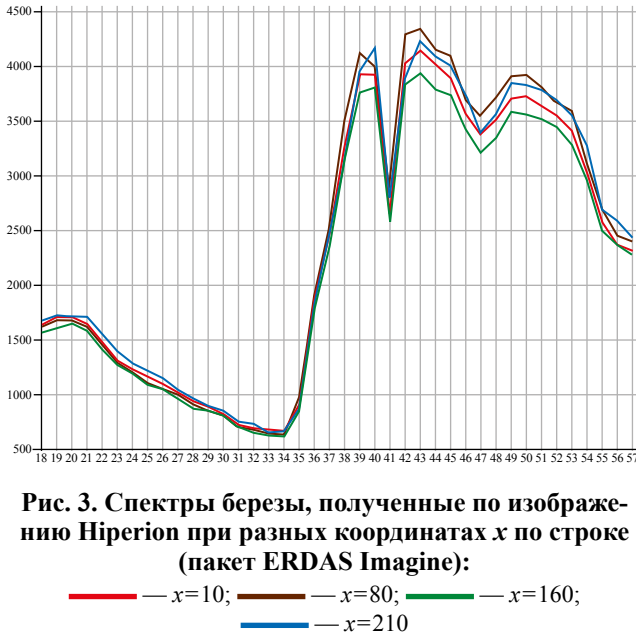


Рис. 3. Спектры березы, полученные по изображению Hyperion при разных координатах x по строке (пакет ERDAS Imagine):

— $x=10$; — $x=80$; — $x=160$;
— $x=210$

езде под значением яркости $b(\lambda)$ подразумевается нормированная величина $b(\lambda) = B(\lambda) / B_{50}$, где B — исходная яркость в отсчетах цифровой шкалы.

Так как информация представлена дискретными значениями яркости, усредненными по ширине канала $\Delta\lambda$, будем считать линейными зависимость яркости растительности от длины волны и зависимость изменения яркостей в каналах 40 и 42 от положения центра канала 41. Тогда можно определить интерполяционное значение яркости (без учета поглощения) в канале 41 как

$$b_{41}^0(\lambda_0) = \frac{b_{40}(\lambda_0) + b_{42}(\lambda_0)}{2}. \quad (1)$$

При сдвиге канала влево на величину $\delta\lambda$ канал 41 сместится в сторону канала 42, и яркость в канале 42 уменьшится на величину $\delta b_{41}^0(\lambda_0) - \frac{\delta b_{42-40}^0}{\delta\lambda}$. Яркость в канале 40 в то же

время увеличится на $\frac{\delta b_{42-40}^0}{\delta\lambda}$, где b_{42-40}^0 — разность $b_{42} - b_{40}$ при точном положении центра канала на линии поглощения. При сдвиге канала вправо на величину $\delta\lambda$ канал 41 сместится в сторону канала 40, разность $b_{41} - b_{40}$ также уменьшится на величину δb , а яркость канала

42 уменьшится на величину $\frac{\delta b_{42-40}^0}{\delta\lambda}$.

Отсюда получаем следующие выражения для изменения разности каналов 42 и 40 при сдвиге канала влево и вправо на $\delta\lambda$ соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{\delta b_{42-40}}{\delta\lambda_-} &= -\delta b_{41}^0 + \frac{\delta b_{42-40}^0}{2}; \\ \frac{\delta b_{42-40}}{\delta\lambda_+} &= -\delta b_{41}^0 - \frac{\delta b_{42-40}^0}{2}. \end{aligned} \quad (2)$$

При близкой по величине ширине каналов, на границах канала, то есть при $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda/2$ и $\lambda = \lambda_0 - \Delta\lambda/2$, первый член выражения (2) равен $-[b_{41}^0(\lambda_0) - b_{41}(\lambda_0)]/2$. Тогда изменения разности каналов 42 и 40, приходящиеся на $\delta\lambda = 1$ нм, для левого и правого смещения центра составят соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta b_{42-40}(\lambda_-) &= \frac{-2[b_{41}^0(\lambda_0) - b_{41}(\lambda_0)] + b_{42-40}^0}{2 \frac{1}{2} \Delta\lambda}; \\ \Delta b_{42-40}(\lambda_+) &= \frac{-2[b_{41}^0(\lambda_0) - b_{41}(\lambda_0)] - b_{42-40}^0}{2 \frac{1}{2} \Delta\lambda}. \end{aligned} \quad (3)$$

Поправки $\delta\lambda$ для левого и правого смещения в каждой измеренной точке x_i по строке рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \delta\lambda_- &= b_{42-40}(x_i) / \frac{-2[b_{41}^0(\lambda_0) - b_{41}(\lambda_0)] + b_{42-40}^0}{\Delta\lambda}; \\ \delta\lambda_+ &= b_{42-40}(x_i) / \frac{-2[b_{41}^0(\lambda_0) - b_{41}(\lambda_0)] - b_{42-40}^0}{\Delta\lambda}. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, схема расчета спектрального сдвига включает следующие процедуры.

1. Определяем положение пикселя x_0 с центром канала, наиболее близким к значению $\lambda_0 = 762,5$ нм. Анализ яркостных спектров березы при разных положениях пикселя в строке показал, что заметные изменения провала можно регистрировать с шагом не меньше 10 пикселей. Тем не менее, на основе статистических оценок по разным наборам спектров березы было определено, что максимальной величине провала наиболее точно соответствует значение $x=150$ (при общей длине строки 254 пикселя).

2. Определяем разность яркости Δb между каналами 42 и 40, соответствующей точному положению канала: $\Delta b = (b_{42} - b_{40})|_{x=150}$.

3. Определяем интерполяционную яркость в канале 41 (без учета линии поглощения) по формуле (1).

4. Рассчитываем глубину «провала» в канале 41 относительно полученного значения (1): $h_{41} = b_{41}^0(\lambda_0) - b_{41}(\lambda_0)$.

5. Рассчитываем превышения над минимумом h_{42} и h_{40} с учетом линейного роста спектральной яркости с увеличением длины волны:

$$\begin{aligned} h_{42} &= h_{41} + \Delta b / 2; \\ h_{40} &= h_{41} - \Delta b / 2. \end{aligned} \quad (5)$$

6. Создаем набор данных по каналам 40, 41, 42, 50 по строке изображения с выбранным шагом $\Delta x \geq 10$.

7. Для каждого значения x_i из набора данных по строке изображения рассчитываем поправки $\delta\lambda_-$ и $\delta\lambda_+$ по формулам (4).

8. Рассчитываем значения длин волн для каждого значения x из набора данных по строке изображения по формулам:

$$\begin{aligned} \lambda_-(x_i) &= \lambda_0 + \delta\lambda_-; \\ \lambda_+(x_i) &= \lambda_0 + \delta\lambda_+. \end{aligned} \quad (6)$$

9. Аппроксимируем полученную экспериментальную зависимость полиномом низкого порядка. Эксперименты показали, что во всех случаях эта зависимость описывается полиномом второй степени с точностью $R^2 > 0,95$.

Сравнение результатов двух независимых численных экспериментов с данными предполетной и орбитальной калибровки, приведенными в [9], показывает, что результаты расчета данным методом значительно ближе к результатам предполетной (паспортной) калибровки, чем результаты орбитальной калибровки [9], и отличаются не более чем на 0,3 нм (рис. 4). Однако в обоих экспериментах положение центра канала в результате аппроксимации сместилось влево по строке. Судя по всему, определить положение центра канала с точностью выше 0,5 нм вряд ли возможно, на что указывают и некоторые исследователи [7].

Расчет сдвига центров каналов в красном диапазоне. Необходимо отметить, что кроме хлорофилла типа *a*, максимум поглощения которым приходится на интервал длин волн 670–675 нм, в этом же диапазоне излучение поглощает пурпурный пигмент антоцианин, а также хлорофилл типа *b* [3]. Поэтому

абсолютно точное определение минимума кривой спектральной яркости растительности практически невозможно. Вызывает некоторое сомнение и положение минимума в канале 33 аппаратуры Hyperion (681,2 нм) у любых типов растительности. Тем не менее, как и в предыдущем случае, мы предполагали, что хотя бы одному пикселю в строке соответствует точное положение центра канала.

Положение минимума определялось путем аппроксимации локального участка кривой спектральной яркости полиномом второго порядка по четырем значениям в каналах 31, 32, 33, 34 с точностью $R^2 \approx 0,9$. Далее определялось положение минимума λ_i интерполяционной функции $f(\lambda) = a\lambda^2 - b\lambda + c$ из условия $\left. \frac{df(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=\lambda_i} = 0$.

По полученным значениям λ_i для набора данных по строке была выполнена аппроксимация зависимости положения минимума от номера пикселя в строке полиномом второй степени. Заметим, что в проведенных экспериментах наиболее точное соответствие положения минимума интерполяционной функции паспортному центру канала $\lambda_0 = 681,2$ нм также соответствовало номеру пикселя $x = 150$.

Поправки $\delta\lambda_-$ и $\delta\lambda_+$ рассчитывались в обоих случаях как разность $\lambda - \lambda_0$, а истинные положе-

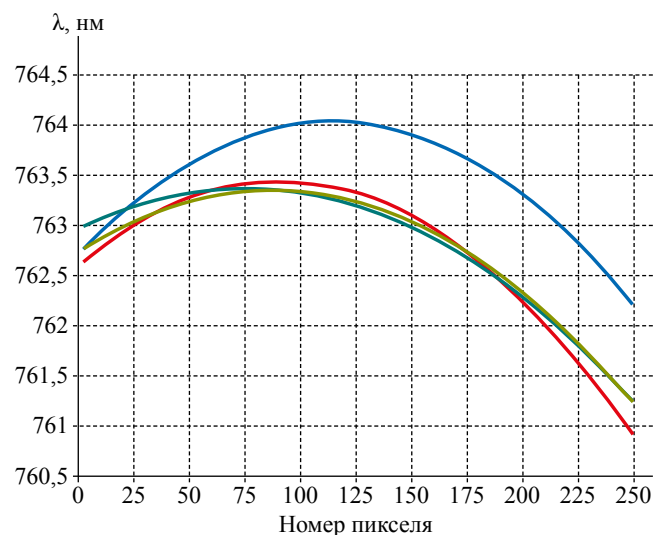


Рис. 4. Сравнение результатов расчета смещения центров каналов по строке с данными предполетной и орбитальной калибровки аппаратуры Hyperion:

— предполетная калибровка; — орбитальная калибровка; — шаг 25 (11 точек); — шаг 10 (26 точек)

ния центров каналов — по формулам (6). Затем, как и в предыдущем случае, была выполнена аппроксимация полученной зависимости полиномом второй степени и соответствующая коррекция свободного члена (рис. 5).

Коэффициенты первой производной полученного полинома были близки к коэффициентам первой производной интерполяцион-

ных полиномов, полученных для канала 41. Поэтому можно предположить, что характер смещения центров каналов по строке во всем видимом и ближнем инфракрасном диапазоне приблизительно одинаков. На основе данного предположения была составлена калибровочная матрица для 50 каналов изображения Hyperion в диапазоне 420–950 нм. Результат

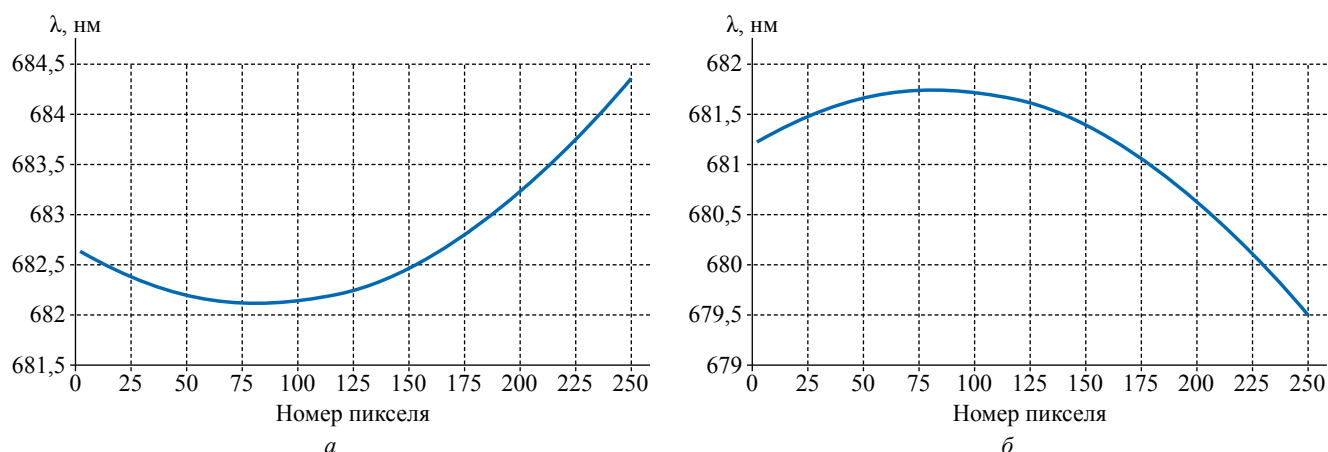


Рис. 5. Зависимости положения интерполяционного минимума в красном канале (а) и рассчитанного на его основе истинного положения центра канала (б) от номера пикселя в строке

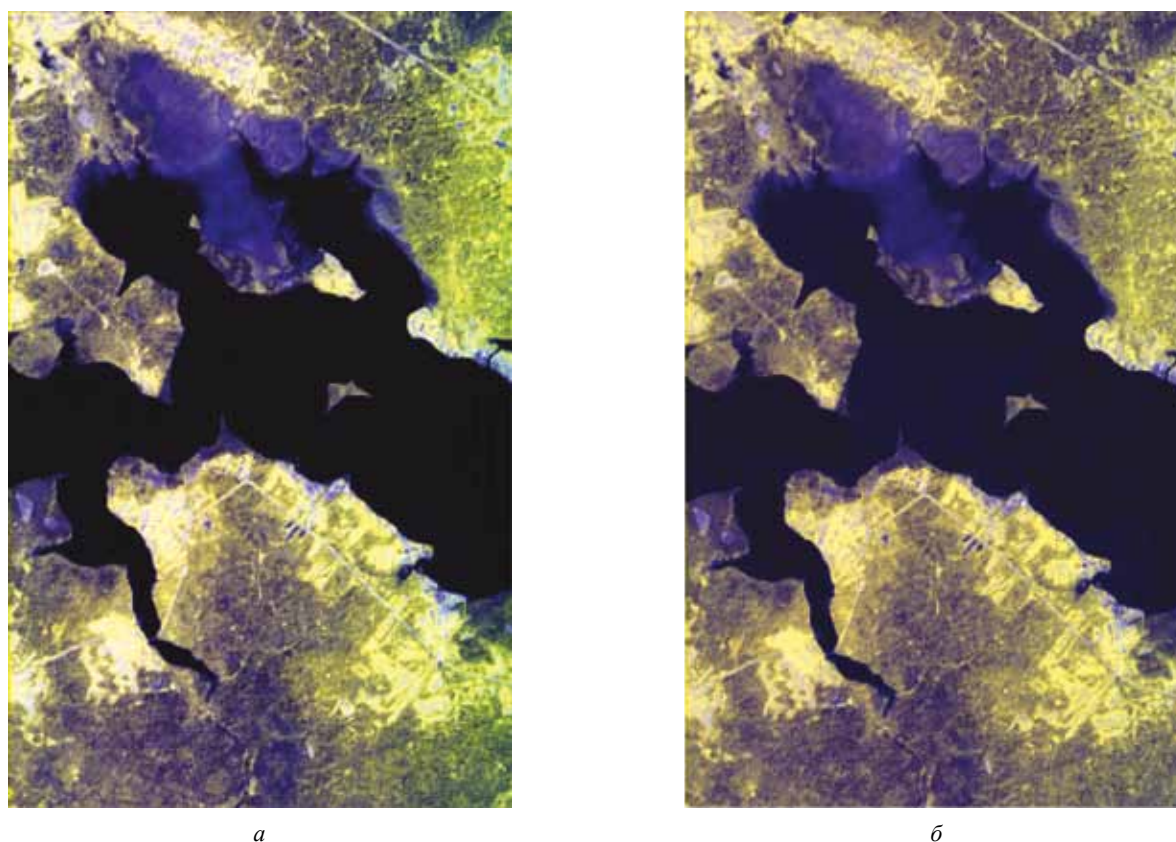


Рис. 6. Фрагмент RGB-композиции изображения Hyperion, составленной из каналов дальнего красного и ближнего ИК-диапазонов:

а — до коррекции; б — после коррекции

выполнения радиометрической коррекции по полученной матрице в пакете обработки гиперспектральных изображений «Альбеда», разработанном в Московском физико-техническом институте [10] оказался положительным (рис. 6).

Коррекция позволила, в частности, существенно улучшить классификацию растительного покрова, благодаря устранению смешивания близких классов в правой части снимка.

Заключение. Основным достоинством предлагаемого метода коррекции «смайлинга» является его доступность широкому кругу потребителей, поскольку он не требует использования процедур атмосферной коррекции. Это особенно существенно при доступе к изображениям через геопорталы, когда пользователь не может одновременно получить данные о состоянии атмосферы на момент выполнения съемки или не имеет в распоряжении программных средств атмосферной коррекции.

Полученные результаты подтверждают возможность использования для данного типа коррекции однородного плотного растительного покрова, которые в достаточном количестве присутствует на летних изображениях в средних широтах. Дальнейшее изучение спектральных отражательных свойств различных типов растительного покрова в перспективе может послужить основой не только для коррекции «смайлинга», но и для выполнения полноценной спектральной калибровки в рассмотренном диапазоне длин волн.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по договору №13-05-12086\13 от 02.08.2013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интернет-ресурс: <http://www.microimages.com/getstart/pdf/hyprspec.pdf>.
2. Thenkabail P.S., Lyon J.G., Huete A. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Taylor & Francis. — 2011. — 781 p.
3. Van der Werff H.M.A., Noomen M.F., Van der Meijde M., Kooistra, J.F., Van der Meer, F.D. Use of hyperspectral remote sensing to detect hazardous gas leakage from pipelines // New developments and challenges in remote sensing / ed. by Z. Bochenek. Millpress : Rotterdam, 2007. — P. 707–715.
4. Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Кудрявцев С.В., Николенко А.А. Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичных видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9. - №2. — С. 111–121.
5. Guanter L., Richter R., Moreno J. Spectral calibration of hyperspectral imagery using atmospheric absorption features // Appl Opt. — 2006. — Vol. 45, № 10. — P. 2360–2370.
6. Guanter L. et al. Scene-based spectral calibration assessment of high spectral resolution imaging spectrometers // Opt. Express. — 2009. — Vol. 17, № 14. — P. 11594–11606.
7. Kawishwar P. Master Thesis of "Atmospheric Correction Models for Retrievals of Calibrated Spectral Profiles from Hyperion EO-1 Data." International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands, 2007. — 84 p.
8. Чабан Л.Н., Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Методы отбора информативных каналов при тематической обработке гиперспектральных изображений // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2014 — №4. — С. 63–74.
9. Barry P., Shepanski J., Segal C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system // Proc. of SPIE. — 2002. — Vol. 4480. — P. 231–235.
10. Интернет-ресурс: <http://www.geo.mipt.ru>

Принята к печати 23 октября 2014 г.
Рекомендовано кафедрой прикладной экологии
и химии МИИГАиК.

УДК 004:528

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ ДЛЯ ПРОГРАММЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ГЭС НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ

Кандидат геогр. наук **А.В. Остроухов**

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск

Ostran2004@bk.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы геоинформационного моделирования параметров проектируемых водохранилищ для информационного обеспечения принятия управленческих решений при разработке программы строительства гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке с целью решения задач регулирования стока и рационального использования водных ресурсов р. Амур. В качестве основы такого обеспечения предложена и разработана информационно-картографическая база данных «Существующие и проектируемые гидроузлы и современное состояние территории Российской части бассейна р. Амур», реализованная в программной среде ArcGIS – ArcReader 10.1.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, информационно- картографическое обеспечение, ЦМР, проектирование водохранилищ

Abstract. Geoinformational modeling of parameters of contemplated reservoirs is discussed in terms of providing management with decision-making information while developing program for the construction of hydraulic structures in the Far East of Russia for flow regulation and rational use of water resources of the river Amur. Database "Existing and planned hydroschemes and current state of the Russian part of the Amur river basin" was developed and implemented in Arcgis Arc-Reader 10.1

Keywords: GIS modeling, information and mapping software, DEM, designing of reservoirs

Хабаровский край и юг Дальнего Востока в целом относятся к числу регионов, хорошо обеспеченных ресурсами поверхностных и подземных вод. Река Амур — одна из наиболее значительных рек Российской Федерации, занимающая третье место по длине и четвертое — по площади бассейна.

При весьма существенном водно-ресурсном потенциале края возникают проблемы его использования обусловленные, в том числе и резкой неравномерностью поверхностного стока по сезонам года. Серьезная проблема, требующая особого внимания — возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) в результате наводнений. Территория юга Дальнего Востока периодически подвергается подтоплению и затоплению при прохождении паводков. Главная особенность наводнений — одновременный охват ими больших площадей и создание ЧС с угрозой не только материальным ценностям, экономике территорий, но и жизни людей.

В августе – сентябре 2013 г. в бассейне р. Амур прошел катастрофический паводок, в ходе которого были превышены исторические максимумы уровней воды Амура за более чем столетний период наблюдений.

Для решения задач регулирования стока и рационального использования водных ресурсов Амура было принято решение о подготовке проекта «Программы строительства новых гидроэнергетических объектов на притоках реки Амур и разработки рекомендаций по охране окружающей среды при строительстве новых гидроэнергетических объектов» (ООО «Ленгидропроект», г. Санкт-Петербург). При разработке проекта необходимо было решить следующий комплекс задач:

оценка современного состояния компонентов природной среды рассматриваемой территории;

разработка рекомендаций по охране окружающей среды при проектировании перспективных объектов;

определение ограничений для планируемого использования территории.

Большой территориальный охват поставленных задач, их комплексный характер и сжатые сроки их выполнения определили высокие требования к информационно-картографическому обеспечению, которое должно гарантировать решение одной из важнейших задач — пространственное объединение разнообразных и разнородных данных. Решение этой задачи обеспечивается разработкой цифровой модели местности (ЦММ) в среде ГИС-приложений и созданием информационно-картографической базы данных «Существующие и проектируемые гидроузлы и современное состояние территории Российской части бассейна реки Амур» для информационного обеспечения принятия управленческих решений при подготовке программы строительства гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке. Источником информации для цифровой модели местности являются государственные топографические карты различных масштабов, тематические карты различного назначения, данные ДЗЗ и цифровой модели рельефа (ЦМР).

Основой тематического информационного наполнения ЦММ должна была стать информация о расположении и характеристиках существующих и планируемых водохранилищах. Для всесторонней оценки влияния гидротехнических сооружений на окружающую среду, необходимо знать целый ряд параметров создаваемых водохранилищ, таких как их конфигурацию, площадь, объем, средние и максимальные глубины и т.д. Эти данные востребованы при оценке степени воздействия водохранилища на растительный и животный мир, почвенный покров и геосистемы территории в целом; определении динамики биопродуктивности водных объектов; оценке изменения качества воды и определении объемов затрат для снижения или предотвращения экологического ущерба.

В то же время, представленные разработчиком проекта данные включали лишь два параметра — расстояние от устья до плотины и планируемый нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища для 19 проектируемых водохранилищ на реках Шилка, Зея, Гилуй, Селемджа, Бурея, Ниман, Большая Уссурка.

Расчёт остальных параметров традиционными методами — очень трудоёмок и занимает от одного до шести месяцев для одного водохранилища.

Все вышеперечисленное обусловило использование современного инструментария ГИС-моделирования для расчёта основных морфометрических характеристик.

Моделирование мест расположения плотин и зон затопления водохранилищ осуществлялось на основе представленных характеристик и данных цифровых моделей рельефа SRTM 4.1, прошедших процедуру гидрологической коррекции [1, с коррекцией 2]. Обработка данных SRTM 4.1 и расчёт морфометрических параметров производились в модулях 3D-Analyst и Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS 10.1.

На начальном этапе проводилась склейка и проецирование данных SRTM. В дальнейшем на основе векторной топографической основы в масштабе 1:200 000 определялись примерные координаты расположения плотины и в модуле Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS 10.1. рассчитывались границы зоны затопления при заданном нормальном подпорном уровне.

В отдельных случаях в связи с низким качеством исходных данных рассчитывались несколько вариантов размещения водохранилища. Например, при смещении места возможного расположения плотины Стойбинской ГЭС на расстояние в 500 м выше или ниже (320,5 км и 321,5 км от устья, при указанных 321 км) площадь водохранилища меняется с 90 до 152 км², а объём — с 1,48 до 2,55 км³ (рис. 1). В результате рассмотрения нескольких вариантов, общее количество объектов увеличилось с 19 до 25.

В дальнейшем, для определения объёмов водохранилища и его глубин проводилась контурная обрезка ЦМР и его приведение к нулевой отметке на высоте НПУ.

На основе полученных картографических моделей в модуле 3D-Analyst программного комплекса ArcGIS 10.1 был проведён расчёт морфометрических характеристик 26 водохранилищ, результат представлен в картографическом и информационно-справочном виде (рис. 2, табл. 1).

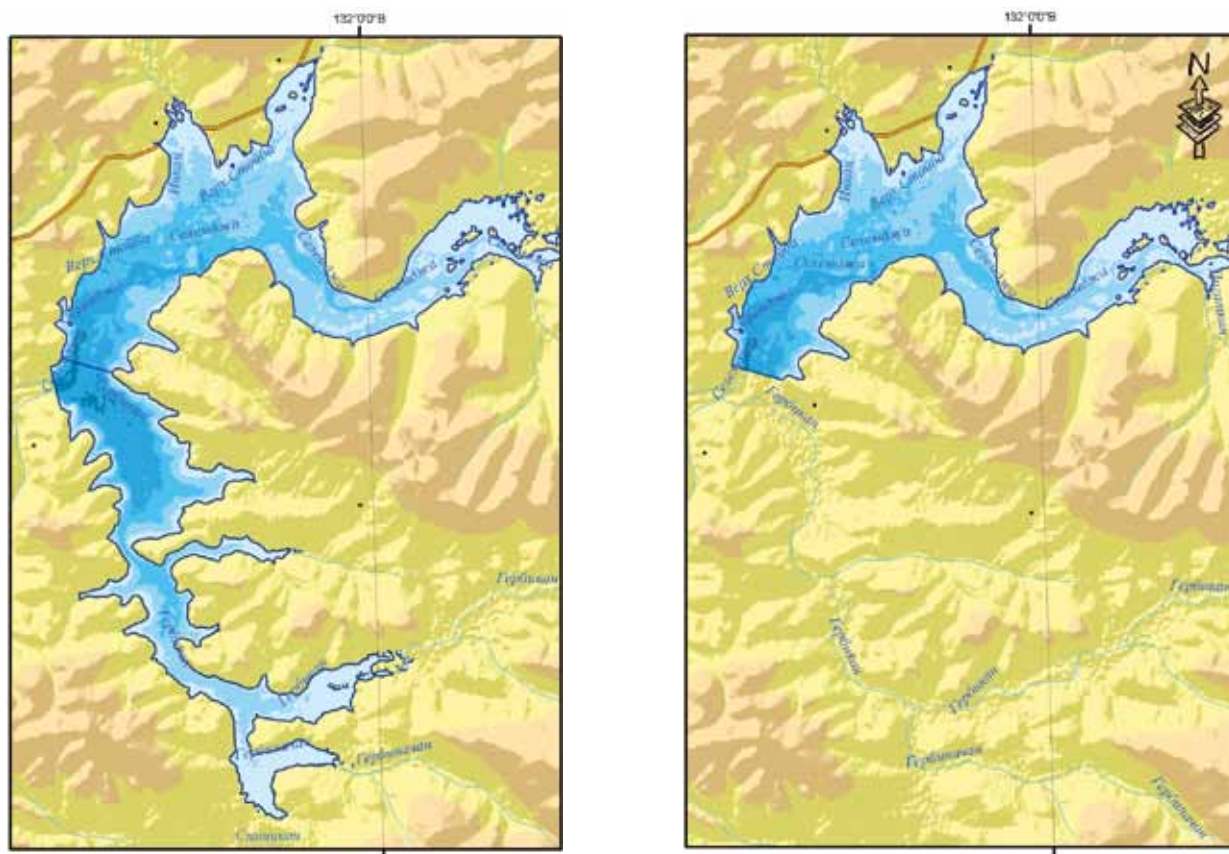


Рис. 1. Варианты размещения Стойбинской ГЭС

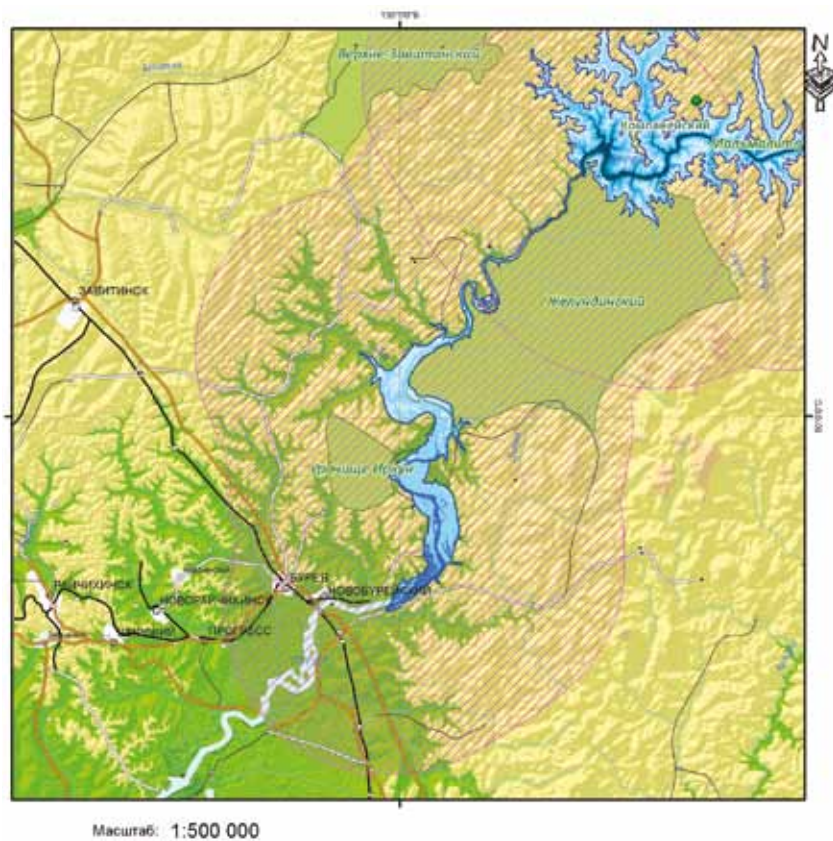


Рис. 2. Карта зоны затопления Нижне-Бурейского водохранилища:

— буферная зона в 20 км;

ООПТ в 20-ти километровой зоне от района затопления планируемой ГЭС (Категории ООПТ):

— заповедник;

— охранный зона заповедника;

— федеральный заказник;

— охранный зона заказника;

— заказник регионального значения;

— национальный парк;

— орехопромысловая зона

Таблица 1

Параметры водохранилищ, рассчитанные по данным SRTM 4.1

ГЭС	Река	Расстояние от устья, км	Отметка НПУ, м/УМО	Площадь водхр. при НПУ, км ²	Расстояние от устья, км	Объем полный при НПУ, км ³	Площадь зеркала при НПУ, км ²	Длина водохранилища, км	Статистические характеристики глубин водохранилища, м	
									Максимальная	Средняя
Бурейская	Бурея	174,2	256,0	740	174,2	19,98	720,9	234,0	124	27,6
Нижне-Бурейская		84,6	138,0	154	84,6	2,016	149,9	146,9	32	12,9
Гилуйская	Гилуй	105	430,0	209,0	105	5,841	188,8	145,4	89	28,04
Инжанская	Зея	515,3	221,5	257,8*	515,3	9,727	768,5	98,1	36	11,6
Нижне-Зейская (Грамотухинская)		290,2	187,0		290,2	2,726	272	212	32	10,6
Селемджинская	Селемджа	124	215,0	780	124	1,738	296,61	32	24	6,7
Селемджинская		124	225,0	780	124	6,733	749,90	51	34	9,6
Чалбинская		281,0	340,0	190,0	281,0	2,672	192,8	34	40	12,8
Стойбинская		321,0	390,0	187,7	320,5	2,552	152,1	34	46	15,3
Стойбинская		321,0	390,0	187,7	321,5	1,48	90,86	32	43	14,9
Русиновская		365,0	490,0	210,0	365,0	6,341	193,8	69	91	32,5
Экимчанская		454,5	610,0	196,0	454,5	6,252	172,6	50	107	36,1
Верхне-Ниманская	Ниман		561,0		119	0,731	21,0	22	105	36,3
Усманская	Бурея		542,0		542	1,315	49,66	90	83	26,3
Усть-Ниманская			363,0		452	13,47	416,1	40	74	31,6
Ургальская ГЭС-1 (Нижнениманская)	Ниман	27,3	450,0	371,0	27,3	12,86	359,1	90	131	36,3
Ургальская	Бурея				414	2,56	189,0	41	41	13,4
ГЭС-3	Б. Уссурка		320,0		192	4,584	135,2	63,7	89	33,3
ГЭС-3			320,0		200	2,323	73,6	51	82	30,9
Дальнереченская		177,0	214,0	97,0	152	0,851	59,12	28,1	37	13,4
Востречовская		151,0	177,0	55,11	115	2,047	108,5	36	44	17,9
ГЭС-16	Дальняя		255,0		5,9	2,606	86,5	32	72	29,5
Шилкинская	р. Шилка	75,0	420	48,9	75	13,817	450,6	270	100	31,0
Шилкинская		75,0	400	48,9	75	6,503	271,9	210	80	23,7
Шилкинская		75,0	395	48,9	75	4,226	227,5	195	75	22,8

*— Для варианта с противопаводковой емкостью

Для оценки точности полученных результатов кроме перспективных водохранилищ был произведен расчет параметров для существующего Бурейского водохранилища (табл. 2)

Таблица 2

Морфометрические параметры Бурейского водохранилища, полученные традиционными методами и при моделировании тела водохранилища по данным STRM 4.1

Параметры при НПУ	Официальные данные	По данным STRM 4.1
Объем полный, км ³	20,94	19,98
Площадь, км ²	740	720,9

Полученная 5% разница объема и 3% разница площади может объясняться низкой точностью картографических данных, использованных при расчёте официальных параметров водохранилища (расчёты проводились по карте масштаба 1 : 200 000). На рис. 3 приведено соотношение границ водохранилища, рас-

считанных по данным SRTM, отраженных на карте масштаба 1:100 000 (2008 г.) и снимке Landsat-7 (2011 г.).

В сумме было смоделировано 25 водохранилищ (для ряда объектов — по 2–3 варианта размещения), для каждого проведена подготовка цифровой модели рельефа места расположения, выделение зоны затопления, выполнен расчёт ЦМР ложа водохранилища и раstra глубин, расчёт статистических параметров. Всего в картографической и информационно-статистической базе собрано 192 картографических слоя и 105 таблиц. Для удобства анализа и представления, полученные контуры и атрибутивная информация были собраны в единое результирующее покрытие (базу данных) контуров перспективных гидроузлов и их буферных зон с привязанной атрибутивной и справочной информацией.

Для оценки современного состояния ком-



Рис. 3. Соотношение границ Бурейского водохранилища, выделенных по данным SRTM (—), на топографической карте масштаба 1:100 000 (---) на фоне снимка Landsat 7 (2011г.) (■ — зеркало воды, ■ — зона осушки). Масштаб 1 : 50 000

понентов природной среды рассматриваемой территории, разработки рекомендаций по охране окружающей среды при проектировании перспективных объектов и определения ограничений для планируемого использования территории была разработана цифровая модель местности, представленная в информационно-картографической базе данных. Она создана на основе полученных в результате моделирования пространственных данных и опубликованных картографических и геоинформационных материалов (топографические карты различных масштабов, тематические карты различного назначения, материалы данных дистанционного зондирования земли) и реализована в программной среде ArcGIS 10.1. Для конечного потребителя предоставляется в виде публикации ArcReader 10.1. Информация представлена в формате векторных ESRI shape файлов и в растровых форматах GeoTIFF, jpeg в виде «Проекта ArcGIS 10.1» и «публикации ArcReader 10.1», в метрической системе координат (метры), в равновеликой конической проекции Альберса для Дальнего Востока.

Информационно-картографическая база

данных «Существующие и проектируемые гидроузлы и современное состояние территории Российской части бассейна реки Амур» включает в себя следующее картографическое наполнение.

1. Карта водохранилища планируемых ГЭС в бассейне Амур. На карте представлен результат моделирования мест расположения плотин и зон затопления водохранилищ перспективных ГЭС. Содержит 192 картографических слоя, сгруппированных по названию водохранилищ и два результирующих покрытия с атрибутивной и справочной информацией.

2. Топографическая карта Юга Дальнего Востока 1:1 000 000. Создана на основе: «Цифровая модель местности территории Российской Федерации» [3], представлены только южные районы Дальнего Востока.

3. Топографическая карта бассейна р. Амур 1:2 000 000 [4].

4. Карта «Особо охраняемые природные территории бассейна реки Амур» [5].

Представленные тематические слои: особо охраняемые природные территории бассейна р. Амур, масштабы — 1:100 000–1:1 000 000; памятники природы; памятники природы в двадцатикилометровой зоне от района затопления планируемых ГЭС;

ООПТ в двадцатикилометровой зоне от района затопления планируемых ГЭС.

5. Карта «Биоразнообразие бассейна Амура и ареалы некоторых видов». Источник пространственных данных — Амурский информационный центр [6], авторы: WWF Amur Branch.

6. Почвенная карта Российской части бассейна Амура на основе Почвенной карты России в масштабе 1:2 500 000 [7].

Обобщенная версия почвенной карты России в масштабе 1:25 000 000, совмещенная с атрибутивной базой данных с 26 пространственно привязанными и 51 типологически привязанными параметрами.

7. Карта «Ландшафты бассейна реки Амур», масштаб 1:2 000 000.

Авторы: Дальневосточное отделение Российской Академии Наук; Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина; группа

геоинформационных технологий, г. Хабаровск, октябрь, 2006 г., на основе Ландшафтной карты СССР 1987 г. под ред. И. С. Гудилина.

8. Карта наземных экосистем Российской части бассейна Амура. Разработана на основе обработки материалов «Карта наземных экосистем России. Период/время наблюдения: 2000 г.» [8] и является результатом интерпретации данных спутника SPOT-Vegetation. Метод создания карты включал классификацию основных типов земного покрова с использованием набора улучшенных продуктов спутниковых данных, характеризующих фенологическую динамику растительности, уровень влагосодержания и анизотропные свойства отражения земной поверхности, а также длительность залегания снежного покрова.

Авторы: Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии, Институт космических исследований РАН, Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Разработано в рамках проекта Global Landcover 2000.

9. Карта «Экорегiónы Дальнего Востока». Представлено покрытие глобально-экорегiónального зонирования Бэйли [9]. Карта показывает экосистемы региона уровня — «экорегiónы», согласно классификации Crowley аналогичные по сути термину «экобиом», предложенным Polunin в 1984 г. Дополнительная информация и характеристики регионов представлены на связанном интернет-ресурсе: Biomes | Conserving Biomes | WWF <http://worldwildlife.org/biomes>.

10. Карта Основные типы растительности бассейна реки Амур. Карта типов растительности для Амурского бассейна на английском языке из данных работы Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results/ Günther Fischer., Harrij van Velthuisen., Freddy O. Nachtergaele. IR-00-064/ IIASA. November, 2000. На основе карты типов растительности для территории бассейна р. Амур, масштаба 1:5 000 000 [6].

11. Безоблачное покрытие территории данными ДЗЗ спутника Landsat-8 (июнь–август, 2013), комбинация видимых каналов (4,3,2) с усилением по инфракрасному каналу.

Источник: геологическая служба США предоставила всем заинтересованным пользо-

вателям возможность бесплатного доступа к снимкам Земли, получаемым с помощью нового американского спутника ДЗЗ Landsat-8. Снимки находятся в открытом доступе на трех интернет-порталах: EarthExplorer, GloVis и LandsatLook Viewer [10–12].

В покрытии представлено 23 снимка за июнь–август 2013 г. с уровнем облачности менее 30%, обработанные в ArcGIS 10.1.

12. Цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 90 м/пиксель на территорию бассейна р. Амур на базе данных SRTM 4, созданная для отражения территории региона в среднем пространственном разрешении.

Заключение. Таким образом, для обеспечения информационной поддержки принятия управленческих решений была разработана цифровая модель местности, реализованная в информационно-картографической базе данных «Существующие и проектируемые гидроузлы и современное состояние территории Российской части бассейна реки Амур». Она создана в программной среде ArcGIS 10.1 – ArcReader 10.1. В основу её легли полученные в результате использования геоинформационного моделирования характеристики конфигурации и параметров проектируемых водохранилищ и опубликованные картографические и геоинформационные материалы (топографические карты различных масштабов, тематические карты различного назначения, материалы данных дистанционного зондирования земли). Полученные данные нашли применение при подготовке программы строительства гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке с целью решения задач регулирования стока и рационального использования водных ресурсов р. Амур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.
2. GIS-Lab: Описание и получение данных SRTM, 2013 | <http://gis-lab.info/qa/srtm.html>.
3. Цифровая модель местности территории Российской Федерации, М 1:1 000 000, 2006.
4. Топографическая карта бассейна р. Амур 1:2 000 000, Дальневосточное отделение РАН, Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина, группа геоинформационных технологий, Хабаровск, 2006.
5. GIS-Data Virtual Information Center for Amur River Region (VI-CARR) VICARR-GIS | http://amur-heilong.net/Gis_site/gis_index.html

6. Амурский информационный центр, 2013 | Портал /Карты <http://amur-heilong.net/aic/ru/7/maps/>.

7. Столбовой В. Почвенная карта России в масштабе 1:2500000 (на основе Фридлянд, 1988) /Land Resources of Russia CD-ROM, http://web.archive.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/soil.htm [элек-тронный ресурс, свободный доступ], 2007.

8. Барталев С.А., Белвард А.С., Еришов Д.В., Исаев А.С. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная

система TerraNorte. Институт космических исследований РАН, 2004. | <http://terranorte.ru/?page=infoprod&prod=3&mode=general>.

9. Глобальное экорегиональное зонирование. Бэйли, 1989 | <http://gis-lab.info/data/bailey/bailey-vector>.

10. EarthExplorer | <http://earthexplorer.usgs.gov>.

11. GloVis | <http://glovis.usgs.gov>.

12. LandsatLook | Viewer <http://landsatlook.usgs.gov>.

Принято к печати 13 марта 2014 г.

О МЕТОДЕ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ЦЕЛЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Начальник исследовательской лаборатории Д.С. Лубнин, аспирант А.Ю. Быстров,
аспирант А.А. Назаров, аспирант К.В. Берёзина, ведущий инженер М.А. Андреев,
аспирант О.Г. Гвоздев, аспирант Е.В. Стоволосов,

директор ИНОЦ «Геомониторинг», кандидат техн. наук А.В. Гречищев

Московский государственный университет геодезии и картографии

dmluu@yandex.ru, agre4@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен метод комплексирования и применения различной информации о местности, получаемой системами дистанционного зондирования, необходимой для поддержки и оперативного принятия решений. Метод основан на объединении технологий оперативной аналитической обработки данных OLAP (OnLine Analytical Processing) и ГИС.

Ключевые слова: пространственные данные, многомерное моделирование, гиперкуб, дистанционное зондирование (ДЗ), географические информационные системы (ГИС), пространственная оперативная аналитическая обработка

Abstract. Here we consider a method of integration and use of different information about terrain, received by the remote sensing systems and needed to support and operational decision-making. The method is based on combining OLAP (OnLine Analytical Processing) technology and GIS.

Keywords: Spatial data, multidimensional modeling, hypercube, remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), Spatial On-Line Analytical Processing (SOLAP)

Введение. В чрезвычайных ситуациях, например, таких как наводнения, паводки, пожары, экологические бедствия, охватывающие обширные территории, для поддержки принятия решений зачастую требуется быстрый и масштабный доступ к разного рода пространственным (аэрокосмические снимки, картографические материалы, модели рельефа, тематические карты) и непространственным (описания, отчеты, статистические сведения) данным об объектах и местности. Оперативная съёмка и применение методов и средств ДЗ сами по себе не дадут значимого эффекта, если не использовать современные способы обработки, хранения и визуализации информации, особенно с учетом того, что превалирование требования актуальности обусловит заедство изображений с различными пространственным разрешением и геометрией

съёмки, полученных в разных спектральных зонах и т.д.

В связи с этим появляется потребность в специальной подготовке разнородных пространственных данных, их комплексной аналитике в режиме, максимально приближенном к режиму реального времени, с целью получения качественно новых согласованных знаний. В процессе анализа информации часто возникает необходимость в установлении зависимостей между учитываемыми параметрами, число которых может варьировать в широких пределах. Множественность измерений, являющихся последовательностью значений (или оснований для их вычисления) одного из анализируемых параметров, предполагает многомерное моделирование, суть которого — множественная перспектива, состоящая из рядов независимых измерений, вдоль которых ана-

лизируются определённые совокупности данных. Одновременный анализ по нескольким измерениям определяется как многомерный анализ [1].

В настоящее время многомерные модели данных реализуются в различных технологиях и приложениях и в первую очередь в технологиях оперативной аналитической обработки данных OLAP (OnLine Analytical Processing) [2, 3]. Но, как правило, при этом проводится оперативный анализ массивов текстово-числовой информации. А когда речь идёт о работе с пространственными данными, чаще всего применяются геоинформационные технологии, ГИС. В предлагаемой статье рассмотрены некоторые аспекты интеграции указанных технологий в случае оперативной обработки разновременных, полученных в различных спектральных диапазонах и с разным пространственным разрешением данных дистанционного зондирования.

OLAP-системы. В многомерных моделях данные представляют в виде n -мерного куба (data cube) или гиперкуба (метакуба, поликуба), ребрами которого являются измерения (dimensions), а ячейками — меры (measures), количественно характеризующие анализируемые факты (отсчеты), располагающиеся на пересечениях осей измерений. При этом рёбра гиперкуба чаще всего несоразмерны. Над гиперкубом в OLAP-системах могут выполняться такие операции, как: *сре́з* (slice) — формирование подмножества многомерного массива данных для единственного значения одного или нескольких элементов измерений вне этого подмножества; *вращение* (rotate) — изменение расположения измерений; *консолидация* (drill up) и *детализация* (drill down) — операции, которые соответственно определяют переход от детального (down) представления данных к агрегированному (up) и наоборот. Направление детализации (обобщения) может быть задано как по иерархии отдельных измерений, так и согласно прочим отношениям, установленным в рамках измерений или между измерениями. Другими словами, эти операции можно определить как «нарезку», т.е. выделение некоторого подкуба в исходном пространстве с расщеплением его (детализация) или обобщением (агрегирование) [1].

В OLAP-системах число измерений кубов не ограничено, основное назначение таких систем — информационная поддержка комплексного анализа вероятных гипотез при подготовке принятия решений.

Термин OLAP ввёл в 1993 г. Эдгар Кодд [4] — исследователь баз данных и основоположник реляционного подхода к работе с ними. Он последовательно предложил 18 правил, определяющих концепцию организации хранилищ данных, которым должны удовлетворять системы, позволяющие выполнить оперативную аналитическую обработку (см., например, [1]).

На основе требований, изложенных и систематизированных Э. Коддом, в 1995 г. был сформулирован так называемый тест FASMI (*Fast Analysis of Shared Multidimensional Information* — быстрый анализ разделяемой многомерной информации), включающий основные требования к приложениям для многомерного анализа [5].

Возможность анализировать значительные объёмы данных и быстрый отклик на запросы делают OLAP-системы незаменимыми, например, при изучении результатов продаж, маркетинговых мероприятий, дистрибуции продукции и т. д. В этом случае OLAP-кубы содержат показатели такого рода, как: прибыль, рентабельность продукции, совокупные средства (активы), собственные средства, заемные средства и др. Показатели хранятся не в виде простых таблиц, как в обычных системах учета или бухгалтерских программах, а в разрезах, представляющих собой основные категории деятельности организации: товары, магазины, клиенты, время продаж и т. д.

Многомерное моделирование полезно для систем поддержки принятия решений в силу нескольких причин. Во-первых, предварительная агрегация существенно сократила время ответа на длинные запросы, которые могут включать многие миллионы строк. Во-вторых, пользователям системы поддержки принятия решений не обязательно обладать навыками управления базами данных. В-третьих, многомерная модель гораздо ближе образу мышления специалистов-аналитиков, который подразумевает построение выводов на основе множества факторов. Многомерные системы предоставляют свободу исследования данных

и создания разнотипных отчётов без необходимости следовать требованиям формата.

Увы, когда необходимо оперировать данными дистанционного зондирования, обычные OLAP-системы утрачивают своё быстродействие, поскольку резко возрастают временные затраты на дополнительную обработку данных для их пространственного совмещения, интерполяцию, «очистку» и т.д. Логично, что возникает потребность в новых подходах к хранению и представлению накапливаемых в системе данных такого рода.

Геоинформационные системы. Среди современных информационных технологий, активно используемых в комплексах поддержки принятия решений и ориентированных на сбор, хранение, трансформацию, анализ и отображение пространственно-распределённых данных и информации об объектах и событиях, можно назвать и ГИС-технологии. В настоящее время ГИС доступны такие традиционные операции с базами данных, как запрос и статистический анализ, в совокупности с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет карта.

Работая в ГИС с компьютерными картами (интерактивные изображения на мониторах), можно получить доступ к географическим элементам, которые представляются в виде серий тематических слоёв (например, дорог, рек, почв, растительности, населённых пунктов, строений, административных и иных границ, рельефа, спутниковых и другого рода снимков местности), отображающих объекты реального мира для заданных территорий (экстентов).

Пространственная и связанная с нею информация в ГИС разделяется на серии логических информационных слоёв; наборами однородных объектов можно управлять, организуя информацию в отдельные темы, локализуя распределение исследуемого явления и показывая, как каждая тема будет вписана в географическую среду.

Любая пространственно-распределённая (географическая) информация в ГИС представляется и обрабатывается с помощью трех основных структур данных [6]:

классы пространственных объектов — векторные наборы данных (наборы точек, линий и

полигонов);

атрибутивные таблицы (описательная информация);

растровые наборы данных (изображения и данные, основанные на ячейках или пикселях, — материалы космической или аэрофотосъемки, цифровые модели рельефа и т. д.).

Пространственные объекты, отображаемые в векторной или растровой форме, участвуют в отношениях с другими пространственными объектами, а атрибутивные значения поддерживаются одновременно в нескольких таблицах, поэтому каждый из этих основных типов данных может быть расширен за счёт дополнительных возможностей для поддержания целостности данных (например, используя топологию), моделирования географических отношений (связности сети или поток) или добавления расширенного поведения.

Запросы в ГИС можно формировать как путем выделения тех или иных объектов, так и посредством развитых аналитических средств. Современные системы такого рода имеют мощные инструменты анализа, среди которых наиболее значимы два: для оценки близости и оценки наложения.

Эффективность ГИС в основном обусловлена способностью связывать разнородные данные в пространственном контексте, а также графически показывать взаимосвязи между разнообразными явлениями, что предоставляет широкий спектр преимуществ при визуализации, анализе и интеграции пространственных и непространственных данных для поддержки принятия решений. Однако ГИС ограничены, когда дело доходит до сложных многомасштабных, мультिवременных и мультитематических пространственно-временных запросов, в том числе при необходимости обработки, отображения и анализа потоков оперативно получаемых данных дистанционного зондирования с различными характеристиками их формирования, передачи и хранения.

Таким образом, эффективная пространственная система поддержки принятия решений должна объединять возможности ГИС и OLAP, где первая отвечает за управление пространственными данными, а вторая — за многомерность.

SOLAP-технологии. Развитием технологий OLAP и ГИС для комплексного анализа многомерных данных, включающих в себя как дискретные, так и непрерывные пространственные данные, в целях поддержки принятия решений «сверху вниз» стала технология оперативной аналитической обработки пространственных данных SOLAP (*Spatial OnLine Analytical Processing*). В ее рамках геоданные организованы в гиперкубы по нескольким иерархиям-измерениям; основная из них – географическая вложенность, затем следуют организационное деление, иерархия временных отрезков, классификаторы и т. д. [7–10]. SOLAP-технологии начали активно развиваться в последнее десятилетие. У ведущих производителей программного обеспечения, таких как ESRI, Microsoft, IBM, Oracle, подобные решения еще находятся в стадии разработки, также компания GeoMondrian [11] уделяет большое внимание технологиям построения SOLAP-кубов.

Существуют различные базовые подходы к интеграции ГИС и инструментария OLAP, их можно подразделить на: ГИС-доминантные, OLAP-доминантные и общеинтеграционные [7]. Первый подход предполагает использование всех возможностей ГИС и ее графический пользовательский интерфейс, но упрощенный доступ к источникам данных OLAP и отсутствие ее практических функций. Второй подход противоположен первому: он предлагает полный доступ к возможностям OLAP и ее графический пользовательский интерфейс, но ограниченный доступ к функциям ГИС (как правило, только возможности картографического отображения). Соответственно третий вариант реализует наилучшую функциональность и предполагает использование полностью интегрированной технологии SOLAP.

Пример прообраза ГИС-доминантной системы показан на рис. 1 [12]. Гиперкубы пространственных данных смоделированы в ArcGIS (ESRI) с применением специальных программных надстроек для анализа водосборных моделей и разновременных космических снимков.

Сцены, полученные с космических аппаратов серии Landsat (5, 7 и 8), авторами [12] использовались для фиксации изменений земной

поверхности за несколько десятилетий, для чего были применены контролируемая и неконтролируемая классификации. Полученные результаты были структурированы в слои карт и сохранялись в кубы со значениями по X , Y для корректного отражения изображения и значением Z , содержащим время получения изображения.

Как отмечалось выше, в общепринятых многомерных структурах все вовлеченные данные дискретны. Измерения разделены на дискретные иерархические уровни, каждый уровень имеет конечное число дискретных членов, дискретный элемент может быть найден на их пересечении, они же служат координатами в многомерном пространстве. Для естественных явлений пространственные и временные измерения не являются дискретными и должны обрабатываться как непрерывные. Однако они не могут быть измерены непрерывно во всех точках пространства и записаны в такой форме в базу данных в силу определенных причин, одной из которых является дискретная природа вычислительной техники. Измеряются и записываются только отдельные кванты явления, что неминуемо приводит к дискретному представлению непрерывного явления. Это представление отражается в дискретности пространственного и временного измерений в хранилище пространственных данных системы SOLAP. В связи с указанным возможна недооценка характеристик непрерывных данных, отмеченная в [10], приводящая, в частности, к тому, что часть информации будет потеряна или скрыта.

Архитектура системы SOLAP состоит из многомерного структурированного пространственно-временного хранилища данных, соответствующих сервера и клиента [13]. Практически во всех аналитических приложениях в качестве одного из измерений выбирается время, чтобы сделать возможным анализ эволюции данных. Согласно [14], хранилище содержит данные (как пространственные, так и обычные) из разных источников, которые могут иметь различные внутреннюю организацию и формат, при условии их совместимости в процессе поддержки принятия решений. Пространственные измерения могут быть негеометрическими, геометрическими и смешан-

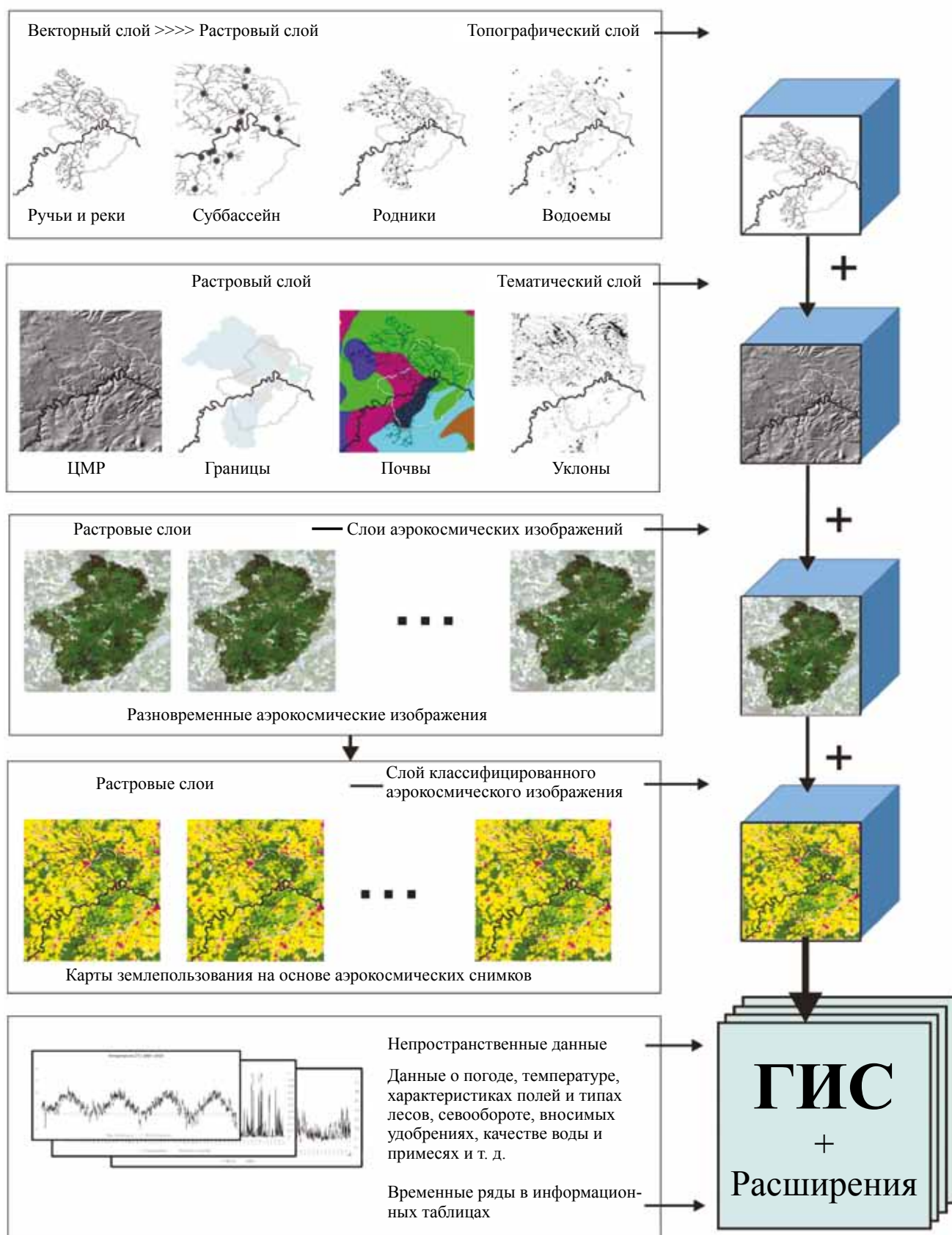


Рис. 1. Интеграция пространственных данных при моделировании водосборного бассейна с применением данных ДЗ в ГИС

ными; реализуются в многомерных структурах только в случае поддержки клиентом многомерной базы данных картографического представления и навигации.

SOLAP может рассматриваться как клиентское приложение для хранилища данных и определяться как визуальная платформа для обеспечения простоты и высокой скорости пространственно-временного анализа данных на основе многомерного подхода с использованием уровней агрегирования.

Наиболее важные свойства SOLAP [13]:

- гибкий интерфейс, поддерживающий разные форматы визуализации;

- доступность навигационных операций во всех формах отображения (диаграммы, карты, изображения, таблицы);

- возможность вводить новые единицы измерения, рассчитанные на основе существующих.

Без картографического отображения инструментарий OLAP не позволяет делать выводы по результатам пространственно-временных исследований. Геовизуализационная функция присутствует в инструментах SOLAP, это активный процесс, подразумевающий отдельные сортировки, выборки, фильтрации и иные трансформации данных в поисках шаблонов и связей.

Инструменты SOLAP для картографического отображения позволяют определять кластеры, корреляции и иные пространственные отношения, которые выходят за predetermined территориальные границы и не видны в случае использования только номинальной пространственной привязки, поддерживаемой в непространственных инструментах OLAP.

Используя инструмент SOLAP, пользователь может проводить анализ без знания языка запросов или основ структур баз данных. С инструментами SOLAP аналитик фокусируется на результатах анализа, а не на процедурах его выполнения.

Экспериментальная реализация метода.

Одним из результатов исследований, выполнявшихся в МИИГАиК в 2012–2013 гг. в соответствии с соглашением №14.В37.21.1243 с Министерством образования и науки Российской Федерации, стала разработка действующего прототипа открытой интерактивной си-

стемы для подготовки специалистов в области применения данных дистанционного зондирования в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера [15,16]. Принцип работы созданного открытого сетевого инструмента подразумевает, что после возникновения чрезвычайной ситуации оператор собирает всю доступную открытую информацию, формируя ее в виде набора слоев, которые можно комбинировать. Эти данные необходимы для предварительной оценки обстановки, выявления очага ЧС и разработки плана действий, этапами которого могут быть выезд на местность с беспилотными летательными аппаратами (БЛА), дозаказ свежей космо- и аэрофотосъемки и пр. Вновь поступающие оператору сведения проходят предобработку, затем помещаются в базу данных и выкладываются на веб-сайт, а также в зависимости от типа становятся доступными в виде веб-сервисов.

Прототип системы имеет два основных узла — ГИС-сервер и веб-портал. Первый базируется на технологии GeoServer [17], генерирует уникальный контент портала и управляет им; второй основывается на библиотеке Leaflet [18], предоставляет инструменты и площадку для комбинирования пространственной информации из различных источников. Использование комбинационной архитектуры обеспечивает интероперабельность ГИС-данных и приложений различных пользовательских уровней — от персонального компьютера до мобильных устройств.

Пространственные данные, собираемые, интегрируемые и отображаемые в системе, должны быть заранее подготовлены, координатно согласованы, загружены на сервер или находиться на каком-либо удалённом сервере в геопривязанном виде с необходимой точностью, чтобы можно было быстро обеспечить к ним доступ и провести требуемую для анализа выборку. В условиях ЧС оперативно обеспечить взаимную согласованность поступающих данных дистанционного зондирования будет проблематичным, поскольку они, как правило, получены различными съёмочными системами, с разной геометрией съёмки, имеют разное пространственное разрешение и т. д., что требует значительных временных затрат на их обработку, трансформацию, интерполяцию.

В связи с этим предлагается метод интеграции разнообразных пространственных данных, основанный на создании и применении базисных гиперкубов.

Базисный гиперкуб, состоящий из набора базисных плоскостей, ранжированных в соответствии с пространственным разрешением, создаётся и загружается в хранилище системы заранее. Например, аналогично картографическим масштабным рядам вводится ряд базисных плоскостей, соответствующих разрешению: **0,1**; 0,25; 0,5; **1,0**; 2,5; 5,0; **10,0**; 25,0; 50,0; **100,0** м. То есть одно из измерений базисного пространственного гиперкуба может содержать срезы, соответствующие по пространственному разрешению указанным выше значениям, два других — это координаты X , Y . При этом базисные плоскости со значением пространственного разрешения, кратного 10, являются основными; промежуточные могут рассчитываться путём интерполяции. Базисные плоскости создаются на основе данных дистанционного зондирования, например, для среза 1 м — из снимков типа Ikonos, QuikBird, GeoEye, Pleiade и др. или их комбинаций, радиометрически согласованных и приведённых к разрешению 1 м; для среза 10 м — из мультиспектральных снимков SPOT и др. Промежуточные сечения данных базисного гиперкуба могут создаваться как методом интерполяции из базисных, так и на основе данных ДЗ, близких по пространственному разрешению к значению среза (тогда такое сечение также становится базисным). Базисные плоскости могут формироваться из разновременных снимков и должны создаваться заранее на основе применения фотограмметрических методов обработки.

После создания базисного гиперкуба, число измерений которого может быть различным в зависимости от количества включаемых в него базисных плоскостей, проводится оперативная геопривязка вновь получаемых данных дистанционного зондирования методом корегистрации, а затем совместный пространственно-временной и тематический анализ. Ранее методом корегистрации авторами уже выполнялись работы по созданию единых ортоизображений по снимкам SPOT-2 и SPOT-4 на обширные территории России [19] и был накоплен значительный практический опыт

такой обработки данных дистанционного зондирования.

Экспериментальная отработка предложенного метода с использованием базисных гиперкубов пространственных данных выполнялась для территории Заокского геодезического полигона МИИГАиК, для которого имеются наборы различных разновременных снимков: панхроматических, мультиспектральных, радиолокационных. Снимки получены как космическими системами дистанционного зондирования, так и различными беспилотными летательными аппаратами. Базисные слои с пространственным разрешением 0,1 и 0,25 м созданы из ортоизображений (фотопланов) местности, полученных методом фототриангуляции по снимкам с БЛА с применением наземных опорных точек и цифровой модели рельефа (ЦМР), сформированной в программе Terra Solid по результатам обработки данных воздушного лазерного сканирования, выполненного в июне 2012 г. сканером Liica ALS-50 [20, 21].

Базисные слои с пространственным разрешением 0,5 и 1,0 м созданы в результате фотограмметрической обработки космического снимка на тестовый участок полигона площадью 200 км², полученного в 2014 г. сенсором Pleiade (исходное пространственное разрешение на местности 0,5 м). Результаты построения триангуляции в цифровой системе «Фотомод» с использованием RPC-коэффициентов, 5 опорных и 20 контрольных точек показали, что остаточные средние квадратические погрешности на контрольных точках составляют 0,43 м, что подтверждает хорошие геометрические свойства изображения и высокую точность орбитальных данных.

Для создания по космическому снимку базисного ортофотоплана на контрольный участок была использована доступная глобальная модель рельефа SRTM. Контроль точности полученного фотоплана выполнен по 25 опорным и контрольным точкам, расположенным на данном участке. Средние квадратические погрешности на контрольных точках составили 2,3 м, что удовлетворяет точности создания карт масштаба 1:5000 и мельче. При создании фотопланов по изображениям Pleiade с точностью карт масштаба 1:2000 необходимы более детальные ЦМР [21].

Базисный слой с пространственным разрешением 10,0 м подготовлен по снимкам SPOT-5 с применением той же модели рельефа. Другие снимки, имеющиеся на территорию геополигона, для проведения сравнительного и тематического анализа привязываются к базовым изображениям гиперкуба методом корегистрации. На рис. 2 показан фрагмент гиперкуба данных на тестовую территорию. На фронтальной плоскости отображен один из снимков территории с пространственным разрешением 2,5 м.

Представленный метод показал эффективность при оперативном мониторинге локальных и протяженных территорий. В силу отсутствия единого подхода и терминологии, развитых средств анализа, основанных на применении модели пространственного гиперкуба данных, требуется дальнейшее его развитие и совершенствование. В последующих исследованиях предполагается оценить возможность расширения применимости предложенного метода, а также выявить потенциальные его ограничения.

Работа выполнена в рамках проведения в МИИГАиК фундаментальных исследований по теме «Разработка метода интеграции мультиспектральных данных дистанционного зондирования оптического диапазона с радиолокационными данными с целью извлечения комплексной геопропространственной информации при мониторинге территории ЧС» (регистрационный номер 10.9220.2014 от 04.02.2014).

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсегян, А. А., Куприянов М.С., Холод И.И., Тесс М.Д., Елизаров С.И. Анализ данных и процессов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009.
2. Кудрявцев Ю. OLAP-технологии: обзор решаемых задач и исследований // Бизнес-информатика. — 2008. — № 1. — С. 66–70.
3. Латышев К. В., Сидоренко В.Н. Применение современных информационных технологий для анализа пространственно распределенных социально-экономических данных // Бизнес-информатика. — 2013. — №1(23). — С. 68–75.
4. Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T. "Providing OLAP (On-Line Analytical Processing) to user-analysts: An IT mandate". Technical report, 1993.
5. Фёдоров А., Елманова Н. Введение в OLAP-технологии Майкрософт. — М.: Диалог-МИФИ, 2002. — 272 с.
6. <http://resources.arcgis.com/ru/help/getting-started/>
7. Rivest S., Bédard Y., Proulx M.-J., Nadeau M., Hubert F., Pastor J. SOLAP technology: Merging business intelligence with geospatial technology for interactive spatio-temporal exploration and analysis of data / ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 60 (2005), 17–33.
8. Bimonte S., Tchounikine A., Miquel M. Towards a Spatial Multidimensional Model. DOLAP'05, November 4–5, 2005,



Рис. 2. Фрагмент гиперкуба пространственных данных на часть тестовой территории

Bremen, Germany.

9. Bimonte S., Tchounikine A., Miquel M. Spatial OLAP: Open Issues and a Web Based Prototype. 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007. Aalborg University, Denmark.
10. Ahmed, T. O. and Buras A.M. CSOLAP (Continuous Spatial On-Line Analytical Processing). World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:3, 2009-06-27, 200-207.
11. <http://www.spatialytics.org/projects/geomondrian/>
12. Matejcek L. Integration of Simulation Models for Watershed Management and Data from Remote Sensing in Geographic Information Systems / International Environmental Modelling and Software Society (iEMSS) - 7th Int.Congress on Env.Modelling and Software, San Diego, CA, USA, P - Poster Session. <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2014-proceedings>
13. Rivest S., Bédard Y., Proulx M.J., Nadeau M. SOLAP: a new type of user interface to support spatio-temporal multidimensional data exploration and analysis. Proceedings of the ISPRS Joint Workshop on Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modelling and Analysis, Quebec, Canada, 2–3 October 2003.
14. Stefanovic N., Han J. and Koperski K. Object-based Selective Materialization for Efficient Implementation of Spatial Data Cubes. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 12(6), 2000, 938–957.
15. Лубнин Д.С. Интеграция распределенных пространственных данных и образовательного контекста в рамках открытого сетевого геоинформационного инструмента в чрезвычайных ситуациях / Материалы VII Всероссийской конференции «Геоинформационные технологии и космический мониторинг», Т. 2, С. 122–127.
16. Mayorov A.A., Lubnin D.S., Grechishev A.V. The application of open – source network GIS tools for geospatial data integration / Сборник статей «Proceeding of the conference on science and technology», Hanoi, Vietnam, 2014, pp.237-242.
17. <http://geoserver.org>
18. <http://leafletjs.com>
19. Гречищев А.В., Лубнин Д.С., Андреев М.В., Быстров А.Ю. Создание единых изображений обширных территорий по данным космических аппаратов SPOT 2 и SPOT 4 // Прил. к журналу Изв вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», Вып. 5, 2012, —С. 14–20.
20. Barbasov V.K., Grechishev A.V., Mayorov A.A. Complexes of unmanned aerial vehicles in the systems of territories monitoring // Сборник статей «Proceeding of the conference on science and technology», Hanoi, Vietnam, 2014, pp.137-144.
21. Курков В.М., Смирнов А.В., Иноземцев Д.П. Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском геополигоне» МИИГАиК // Геопрофи. — 2014. — №4. —С. 55–61.

Принята к печати 5 ноября 2014г.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ

Профессор, кандидат техн. наук **И.И. Лонский**

Московский государственный университет геодезии и картографии

lonski@mail.ru

Аннотация. Отмечено, что карта является информационным продуктом, носителем геопространственной информации, на котором отображены геопространственные данные. Рассмотрены составляющие, определяющие качество карты (математическая основа карты, полнота содержания карт, достоверность карт, геометрическая точность карт, современность карт, качество оформления, научная и социальная ценность), информативность, векторно-иерархический подход к оценке качества картографических произведений.

Ключевые слова: карта, качество, модель, иерархия, информативность, вектор

Abstract. It is marked, that the map is an information product, the carrier of geospatial information where geospatial data is displayed. The components determining quality of a map are considered (mathematical basis, completeness of contents, reliability, geometrical accuracy, modernity, visual design, scientific and social value), informativity, vector-hierarchical approach to estimation of quality of cartographic products.

Keywords: map, quality, model, hierarchy, informativity, vector

В стандарте ГОСТ 15467–79 качество — это совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением. В стандарте ИСО 8402–86 «Качество — совокупность свойств и характеристик продукции или услуги, которые устанавливают назначение, принципы, структуру и правила проведения сертификации в системе сертификации геодезической, топографической и картографической продукции [1–4].

Основне назначения системы сертификации:

проверка и подтверждение соответствия



Рис. 1. Составляющие качества карты в виде графа

продукции установленным требованиям;

содействие потребителям в выборе продукции высокого качества;

повышение конкурентоспособности продукции;

поддержка репутации производителя и повышение доверия к реализуемой продукции, имеющей знак соответствия;

защита интересов государства и его граждан от недобросовестных предприятий и организаций.

Профессор К.А. Салищев в своей работе [5] выполнил анализ и оценку карт (математическая основа карты, полнота содержания, достоверность, геометрическая точность, современность, качество оформления, научная и социальная ценность). Такой подход является системным и комплексным и позволяет на основе анализа составляющих выполнить оценку качества карты.

Иерархическая модель. Совокупность составляющих качества карты (вектор качества) (рис. 1) может быть представлена в виде графа [6, 7].

В вершине графа располагается название «составляющие качества карты», а компоненты графа — это конкретные составляющие качества карты. Такой вектор-граф с одним уровнем иерархии позволяет отобразить лишь компоненты критериев качества карты.

Векторное представление иерархической структуры. Такой иерархической структуре можно поставить в соответствие вектор [6, 7].

При этом под вектором понимается определение, приведенное в [8], последовательность n чисел $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ называют n -мерным вектором:

$$x = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}.$$

Таким образом, вектор-понятие включает в себя некоторое количество компонент (рис. 2). Каждая компонента исходного вектора может представлять собой также вектор, состоящий из некоторого количества компонент и т.д. Каждому понятию был поставлен в соответствие вектор, компонентами которого являлись атрибуты понятия [4–6].

Вектор A может быть описан системой векторов:

$$A = \{a, b, c, d, e\}; \quad a = \{k, l, m, n, o\};$$

$$b = \{1, 2, 3, 4\}; \quad c = \{p, q, r, s\};$$

$$d = \{t, u, v, w, x\}; \quad e = \{5, 6, 7, 8, 9\}.$$

Граф позволяет визуально отображать составляющие, а вектор – иметь перечень составляющих графа. Сочетание графа и вектора предоставляет возможности по отображению и анализу. Компоненты качества карты также имеют свои атрибуты. Количество уровней иерархии характеризует глубину проникновения в критерии качества карты, детализацию рассматриваемого свойства карты. Количество компонент вектора верхнего уровня характеризует широту охвата проблемы, т.е. количество составляющих качества карты. Такая векторно-иерархическая модель позволяет визуализировать структуру системы критериев качества карты, а также рассмотреть конкретные значения точности, полноты карты и др.

Рассмотрим каждую из компонент вектора качества карты [5] и оценим какая информация может располагаться на втором уровне иерархии вектора качества.

Математическая основа карты. При анализе математической основы карты, т.е. ее масштаба, проекции и координатных сеток, компоновки и системы разграфки, а для топографических карт также системы координат и геодезической основы, во многих случаях особенно важно установить целесообразность принятого масштаба. На втором уровне иерархии могут располагаться данные о масштабе, проекции, системе координат.

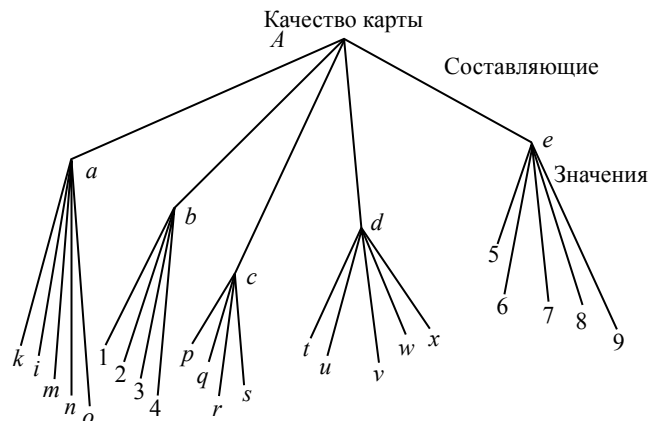


Рис. 2. Качество карты может рассматриваться и вширь, и вглубь

Анализ и оценка полноты содержания карт, оценка объема информации. При оценке полноты содержания карты в соответствии с ее назначением следует конкретно сформулировать требования к карте, уяснить особенности ее использования и далее, исходя из этих предпосылок, географических условий и масштаба карты, проанализировать: перечень (номенклатуру) элементов содержания карты; выбор признаков для классификации каждого из этих элементов; соответствие классификации требованиям методологии и логики и, наконец, степень дробности классификации; надлежащее соотношение между отдельными элементами карты в зависимости от их значения; целесообразность избранных способов изображения, а также общий объем информации, заключенной в карте. Степень полноты карты определяется областью применения карты. На втором уровне иерархии может располагаться перечень элементов содержания карты.

Анализ достоверности карт. Анализ полноты карты как бы отвечает на вопрос, что нанесено на карту. Другое дело, как нанесено, т.е. насколько достоверно отображена действительность, сколь хорошо переданы типические черты и характерные особенности картографируемых явлений, их взаимосвязи и соотношения. Ответ на этот вопрос дает анализ качества генерализации. Степень требуемой достоверности карты определяется областью применения карты. На втором уровне иерархии могут располагаться данные о степени достоверности карты.

Анализ геометрической точности карт.

Составить мнение о геометрической точности карты можно посредством ее сличения с новейшей, заведомо более точной картой, частично перекрывающей исследуемую. Когда источники неизвестны, прибегают к сличению координат или расстояний, измеренных на исследуемой карте, с данными геодезических каталогов или с результатами измерений по заведомо более точным картам. Два-три десятка разностей, полученных на лист карты и обработанных по правилам теории ошибок, позволяют оценить среднюю квадратическую ошибку положения. Требования к точности карты зависят от решаемых с помощью карты задач. На втором уровне иерархии могут располагаться данные о точности карты.

Анализ современности карт. В процессе своего развития природа и человеческое общество непрерывно изменяются и потому ранее созданная карта с течением времени перестает правильно передавать действительность. Появляются новые объекты, другие исчезают или теряют значение; изменяются характеристики объектов и положение объектов в пространстве. При анализе современности карты вначале следует установить, какие временные рамки избраны для нее, оценить целесообразность их выбора и проверить соответствие содержания этому сроку. Степень требований к современности карты зависит от решаемых с помощью карты задач. На втором уровне иерархии могут располагаться данные о современности карты.

Оценка качества оформления карт.

Собственно оценка качества оформления, т.е. примененных на карте изобразительных средств, имеет целью выяснить «читаемость» карты — легкость и быстроту восприятия карты в процессе ее чтения, а также определить экономичность использованных средств и их эстетическое достоинство. На читаемость карты влияет ряд факторов: различимость (индивидуальность) и наглядность отдельных обозначений; зрительное восприятие логических связей; выразительность карты, а также общая графическая нагрузка. Требования к качеству карты определяются решаемыми задачами. На втором уровне иерархии могут располагаться данные о качестве оформления карты.

Анализ научной и социальной ценности карт. Анализ социально-политических досто-

инств карты имеет в виду определение и оценку социальной и политической цели карты. Идеи и взгляды автора могут находить проявление в любом элементе, в любой особенности карты. Поэтому следует выяснять их влияние при анализе карты по каждому критерию и формулировать общий вывод анализа. Карта может не вызывать серьезных замечаний в отношении полноты, геометрической точности, современности и другим критериям, но оказаться неприемлемой в научном или социальном аспекте. Требования к ценности карты определяются решаемыми задачами. На втором уровне иерархии могут располагаться данные о ценности карты.

Информативность карты как составляющая ее качества. Карта является информационным продуктом, носителем геопространственной информации, на котором отображены геопространственные данные, а также содержится атрибутивная информация.

Производитель карты обеспечивает производственное качество, т.е. соответствие карты техническому регламенту, ее назначению, использование материалов, пригодных для длительного использования и пр. Потребителя карты интересует также (в первую очередь) возможность применения карты для решения интересующих его задач. В связи с этим и возникает вопрос информативности карты. Информативно это тогда, когда имеющаяся в наличии информация позволяет решить конкретную задачу [6, 7]. Этим информативность отличается от информационной емкости.

Целевая функция также может быть представлена вектором, включающим такие компоненты задачи, решение которых приводит к достижению цели.

Информативность карты определяется той долей содержащейся в ней информации, благодаря которой пользователь может решить стоящую перед ним задачу. Информативность карты определяется величиной проекции вектора цели на вектор качества карты.

Выводы. Векторно-графовый подход позволяет визуализировать составляющие качества карты и оценивать качество карты в комплексе. Кроме этого такой подход позволяет оценивать информативность карты, которая напрямую связана с потребительскими свойствами карты.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.to73.rosreestr.ru/kartogr/nor_tech_doc/ — интернет-портал Росреестра.
2. *Положения о Системе сертификации геодезической, топографической и картографической продукции*, 2000 г.
3. *Порядок проведения сертификации продукции в системе сертификации геодезической, топографической и картографической продукции*, 2001.
4. <http://www.gisa.ru/certification.html> — геоинформационный портал ГИСА
5. *Салищев К.А.* Картоведение. М.: Изд-во МГУ, 1982. — 408 с.
6. *Лонский И.И.* Информационная оптимизация видеосистем//Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», 1993. — № 4. — С. 149–152.
7. *Лонский И.И.* Сравнительная оценка возможностей информационных систем Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2013. — № 4. — С. 97–99.
8. *Барбаумов В.Е., Ермаков В.И., Кривенцова Н.Н.* и др. Справочник по математике для экономистов. М.: Высшая школа, 1987. — 336 с.

*Принята к печати 22 мая 2014 г.
Рекомендована кафедрой прикладной информатики МИИГАиК.*

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА

Доктор техн. наук **И.Г. Вовк**, кандидат техн. наук **Т.Ю. Бугакова**
Сибирская государственная геодезическая академия, г. Новосибирск
kaf.pi@ssga.ru

Аннотация. В настоящее время техногенная деятельность человека по своим последствиям становится сопоставимой с последствиями естественных процессов. Абсолютную безопасность техногенной деятельности гарантировать невозможно и поэтому возникает необходимость оценивать меру этой опасности, т. е. оценивать риск опасных последствий техногенной деятельности. Изложен один из возможных вариантов решения этой задачи, рассмотрен абстрактный пример выбора варианта изменения пространственно-временного состояния системы.

Ключевые слова: техногенная деятельность человека, риск опасных последствий техногенной деятельности, пространственно-временное состояние систем

Abstract. Nowadays technological and industrial human activities entail some consequences which make them comparable to those of some natural processes. It is well known that complete safety of human activities in the field of hi-tech and industry can hardly be guaranteed and therefore the necessity arises to evaluate danger, degree of threat, i.e. to estimate risk of the dangerous aftereffects of human activities in spheres of modern industry and technologies. The article offers a layout of a way which can be taken to solve the problem and the description of an abstract model choosing the variant of changing the state of a system in space and in time.

Keywords: human activities in the field of hi-tech and industry, risk of dangerous aftereffects, state of systems in space and in time

Интенсивное развитие всех отраслей науки и техники приводит к усложнению техногенных систем. С одной стороны это свидетельствует о научно-техническом прогрессе, с другой — порождает невиданные ранее потенциальные и реальные угрозы человеку, созданным им объектам, локальной и глобальной среде обитания [1]. Возникновение катастроф при строительстве и эксплуатации крупных инженерных сооружений, например, в атомной энергетике, химической промышленности, машиностроении, на транспорте и других отраслях хозяйственной деятельности, вынуждает к принятию мер по обеспечению безопасности их строительства и эксплуатации. Как известно абсолютную безопасность техногенной де-

ятельности гарантировать в принципе невозможно и поэтому возникает необходимость оценивать меру этой опасности, т.е. оценивать риск опасных последствий техногенной деятельности [2–4]

Одним из признаков возникновения техногенных катастроф является изменение пространственно-временного состояния (ПВС) техногенных систем (ТГС), обусловленного их движением и деформациями. Изучая ПВС ТГС можно оценивать опасность ПВС и принимать необходимые меры для снижения техногенного риска.

Движение ТГС — это изменение её положения в пространстве относительно принятой неизменной системы отсчета, а деформация

— движение частей системы относительно друг друга, сопровождающиеся изменениями формы и размеров всего сооружения или отдельных его частей. Форма, размеры и положение в пространстве ТГС, отнесенные к некоторому моменту времени определяют ее пространственно-временное состояние, а функции, характеризующие ПВС системы — характеристики состояния [5]. Например, пространственно-временными характеристиками состояния ТГС могут служить координаты контрольных точек сооружения, расстояния между ними, углы между направлениями векторов, связанных с контрольными точками, уравнения линий и поверхностей, описывающих форму сооружения, площади частей поверхности сооружения и другие функции, определенные на множестве контрольных точек. Выбор характеристик для определения ПВС ТГС неоднозначен, т.е. существует множество вариантов их выбора [2, 6].

Традиционно ПВС системы определяется по координатам контрольных геодезических точек M_i , ($i = \overline{1, n}$), полученным из обработки повторных циклов геодезических измерений, выполненных в фиксированные моменты времени $t_j \in [T_0, T]$, ($j = \overline{1, m}$). Это значит, что исходными данными для оценки, анализа и прогноза ПВС системы служат значения вектор-функций $\overline{r}(t)$, измеренные в точках M_i в моменты t_j , т.е.

$$\overline{r}_{i,j} = \overline{r}_i(t_j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

На результаты наблюдений оказывают влияние разнообразные случайные помехи, интегральное описание которых представим как случайный некоррелированный процесс

$$\overline{\eta} = \overline{\eta}(t) \quad (2)$$

с нулевым средним и постоянной дисперсией, равной дисперсии ошибок измерений. Тогда на основании (1), (2) запишем выражение

$$\overline{r}_{i,j} = \overline{r}_i(t_j) + \overline{\eta}_i(t_j), \quad (3)$$

которое служит основой для определения математической модели ПВС ТС в пространстве, которое называют фазовым пространством (пространством состояний) [6, 7].

Спрашивается, как по данным о ПВС оценить безопасность состояния техногенной си-

стемы? Для ответа на этот вопрос на множестве состояний необходимо определить функцию, характеризующую опасность состояния. Ясно, что только по данным о ПВС или эволюции ПВС техногенной системы определить причины возникновения опасного состояния невозможно. Однако эти данные служат надежным предвестником возможного перехода ТГС из безопасного или неопределенного состояния в опасное и обосновывают необходимость выявления физических причин такого перехода. Задача будет решена, если определить состояние ТГС и установить соответствие между ПВС ТГС и мерой опасности состояния ТГС.

Вариантов решения задачи определения опасности ПВС ТГС, отличающихся между собой ресурсами необходимыми для их реализации и условиями реализации, существует множество [8].

Из этого множества требуется выбрать наиболее приемлемый (полезный, оптимальный) с точки зрения Лица Принимающего Решение вариант. Полезность выбора каждого варианта оценивается мерой его соответствия целям (критериям) выбора. Функцию, которая позволяет оценить полезность вариантов, называют целевой функцией. Если полезность оценивается по одному критерию, то целевую функцию называют однокритериальной, а если по многим критериям, то — многокритериальной. Наиболее простым является случай, когда целевая функция однокритериальная. Тогда для лучшего варианта она принимает экстремальное (минимальное или максимальное) значение. Но в задачах выбора оптимального варианта эволюции состояния ТГС целевая функция, как правило, многокритериальная.

В работе [8] рассмотрен моделирующий алгоритм решения таких задач. На рис. 1 дана геометрическая интерпретация данной задачи, здесь символами A и K обозначены начальное и конечное состояния ТГС; тонким пунктиром — некоторые варианты перехода системы из существующего, начального состояния в желаемое, конечное состояние; жирным пунктиром ограничено пространство возможных состояний системы.

Вариантов перехода системы из состояния A в состояние K множество. Из этого множества выбирают конечное подмножество вариантов

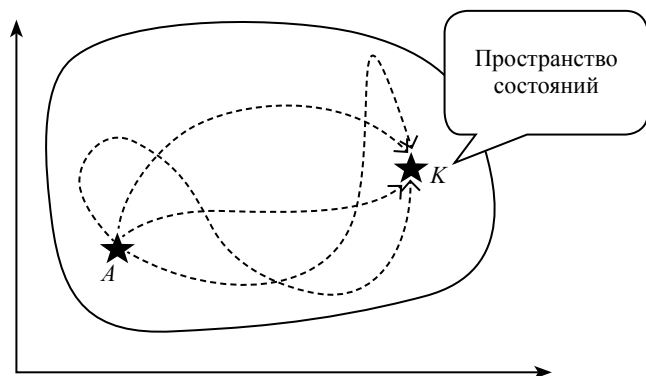


Рис. 1. Геометрическая интерпретация задачи определения ПВС системы

и делят их на конечное число шагов (этапов) реализации, т.е. выполняют декомпозицию задачи оценки и выбора. В результате получают представление вариантов ПВС системы в виде графа (рис. 2).

На этом графе вершины обозначают имена отдельных этапов решения; дуги — возможные пути реализации вариантов [8–11].

Для реализации каждого решения необходимы ресурсы (вещество, энергия, информация, пространство, время и т.д.), которые распределяются по этапам. Обычно наиболее полезным вариантом считается тот, который, обеспечивая достижение цели — обеспечение безопасности системы, требует для своей реализации меньше ресурсов. В задачах выбора наиболее полезного варианта решения целевая функция — многокритериальная. При решении задачи безопасности систем критериями могут служить: вероятность перехода системы в опасное состояние, материальный ущерб для системы или/и окружающей среды из-за перехода системы в опасное состояние, размер области распространения опасности, продолжительность существования опасности или её последствий и др.

В качестве примера рассмотрим процедуру выбора наиболее полезного решения для абстрактной ТГС с графом состояний, изображённым на рис. 3. Всего было рассмотрено четыре варианта такой абстрактной системы. Для выбора наиболее полезного варианта было взято два критерия: Σ_i — математическое ожидание необходимых ресурсов и σ_i — среднее квадратическое отклонение значений затрачиваемых ресурсов [8, 11, 12].

На рис. 3 кружками показаны этапы пере-

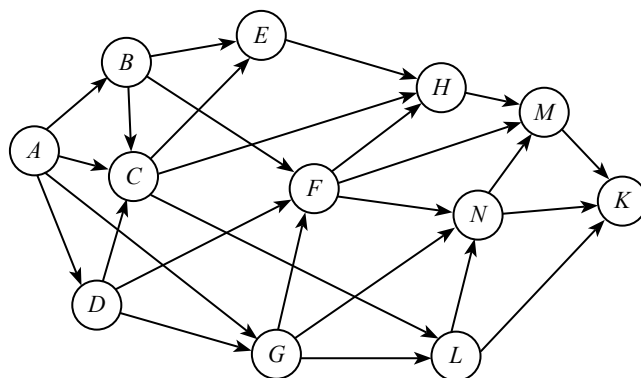


Рис. 2. Граф вариантов ПВС системы ТГС

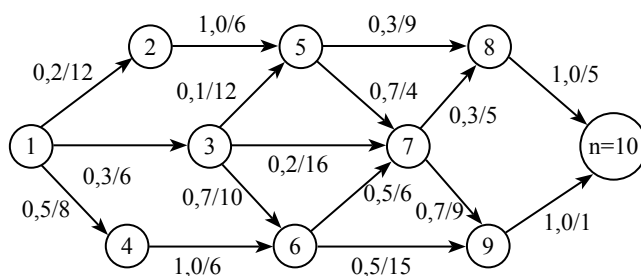


Рис. 3. Размеченный граф системы

хода системы из начального в конечное состояние и стрелками — возможные пути перехода от этапа к этапу. На дугах графа дробью вида a/b показаны: a — вероятность перехода по данной дуге; b — ресурсы, необходимые для перехода в условных единицах. Результаты оценки четырёх рассмотренных вариантов приведены в таблице.

Результаты выбора наиболее полезного решения для абстрактной ТГС

Номер стратегии	Математическое ожидание Σ_i	Среднеквадратическое отклонение σ_i
1	18,09	6,67
2	14,56	10,99
3	12,12	7,08
4	10,25	9,96

Выбор наиболее полезного варианта выполним, полагая значения критериев оценки минимальными. Для наглядности данные таблицы представим в графическом виде (рис. 4)

Анализируя рис. 4, приходим к выводу, что не существует единственного варианта, удовлетворяющего заданным требованиям минимума принятых критериев оценки. Из такой ситуации существует только два неформальных выхода. Первый основан на построении обобщённого критерия, как некоторой функции частных критериев, и решению после этого

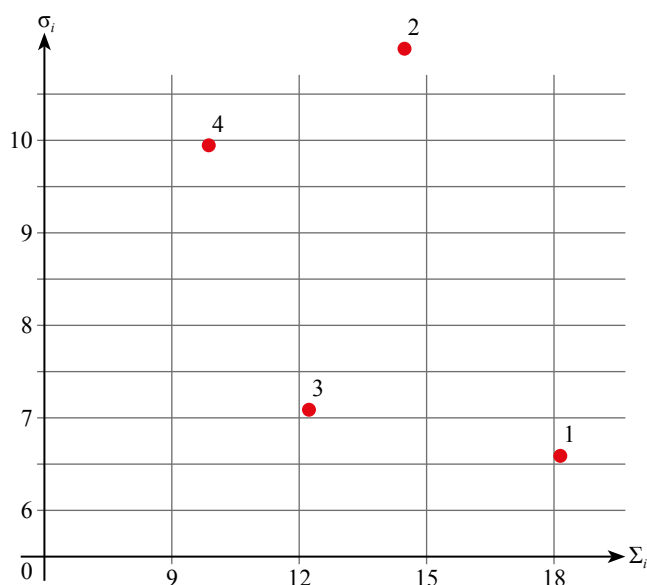


Рис. 4. Графическое представление оценки вариантов

однокритериальной задачи, и второй, основанный на известных методах неформальной, эвристической оптимизации. Однако прежде чем применять эти методы, необходимо убедиться, что среди сравниваемых вариантов нет доминирующих, т.е. таких, которые по всем критериям не хуже хотя бы одного из других вариантов. В нашем примере совершенно очевидно, что варианты 1 и 2 заведомо хуже вариантов 3 и 4. Поэтому варианты 1 и 2 из дальнейшего рассмотрения можно исключить, и выбор лучшего варианта осуществлять из вариантов 3 и 4. Оставшиеся варианты составляют так называемое множество Парето-оптимальных вариантов. Только среди этих вариантов и нужно искать оптимальный. Если Парето-оптимальное множество вариантов состоит из единственного элемента, то это и есть оптимальный вариант и задача оптимального выбора решена. Если же в Парето-оптимальном множестве вариантов более одного элемента, например, как в нашем случае, то необходимо продолжить поиск оптимального варианта среди вариантов, составляющих это множество. Формальных методов нахождения оптимального варианта в Парето-оптимальном множестве не существует.

Окончательный выбор наиболее полезного варианта возможен только на основании дополнительной информации или эвристическими методами. Эвристические методы основаны на

выдвижении различных гипотез оптимальности, основанных на интуиции и опыте людей и позволяющих после этого уже с помощью формальных процедур выбирать оптимальный вариант. Гипотезы оптимальности формулируют, определяя на множестве критериев функцию предпочтения критериев. Однако результаты такой оптимизации субъективны и зависят от выбранной гипотезы оптимальности.

Нередко критерии рассматривают как случайные события, составляющие полную группу, и функция предпочтения не формально (например, на основании экспертных оценок) задаётся распределением вероятности предпочтения критериев. Это позволяет оценить ожидаемую полезность каждого варианта (как математическое ожидание полезности) и выбрать наиболее полезный вариант. При этом имеется возможность оценить потенциальный ущерб (риск), обусловленный выбором варианта.

Изложенные обстоятельства позволяют выполнить декомпозицию задачи оценки и выбора оптимального варианта изменения пространственно-временного состояния ТГС и представить следующий алгоритм её решения [8].

1. Составить модель вариантов в виде графа.
2. Определить критерии, по которым оценивается полезность вариантов.
3. Для каждого критерия определить список оптимальных вариантов (решить задачу динамического программирования).
4. Составить матрицу конкурирующих вариантов.
5. Найти Парето-оптимальное множество вариантов.
6. Сформулировать гипотезы для выбора оптимального варианта.
7. Выбрать оптимальный вариант.

Исследования выполнены по научной работе №1720 в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №2014/141 за 2014 год и найдут применение при оценке и анализе техногенного риска в процессе проектирования, строительства и эксплуатации инженерно-технических систем: зданий и сооружений, дорог, нефте- и газопроводов, при решении задач физической геодинамики, в картографии, экологии и геоинформатике [13–15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере: .– М.: Академия, 2003. – 512 с.
2. Вовк И.Г., Бугакова Т.Ю. Теория определения техногенного геодинамического риска пространственно-временного состояния технических систем // ГЕО-Сибирь-2010: Сб. материалов V Междунар. науч. Конгр. «ГЕО-Сибирь-2010», 19-29 апр. 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА, 2010. – Т.1, ч.2: – С.21–24.
3. Бугакова Т.Ю., Вовк И.Г. Математическое моделирование пространственно-временного состояния систем по геометрическим свойствам и оценка техногенного риска методом экспоненциального сглаживания // Вестник СГГА: 2012. Вып. 4. С. 47–58.
4. Ямбаев Х.К., Яценко В.Р. Геодезический мониторинг движений земной коры: состояние, возможности, перспектива / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. Т. 3. С. 139–155.
5. Бугакова Т.Ю., Вовк И.Г. Выбор варианта изменения пространственно-временного состояния систем в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА. Новосибирск: СГГА, 2014. Вып. 1 (25). С. 145–152.
6. Бугакова Т.Ю. К вопросу оценки риска геотехнических систем по геодезическим данным // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2011:– Т. 1, № –1.– С. 151–157.
7. Бугакова Т.Ю. Определение пространственно-временного состояния систем по результатам многократных геодезических измерений // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка».– 2014. –№ 2. С. 67–70.
8. Вовк И.Г. К вопросу выбора оптимального варианта развития систем // ГЕО-Сибирь-2007. Т. 1: Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч1: Сб. материалов III Междунар. науч. Конгр. «ГЕО-Сибирь-2007», 25–27 апр. 2007 г., Новосибирск. –Новосибирск: СГГА, 2007. –С. 88–91.
9. Бугакова Т.Ю., Вовк И.Г. Математическое моделирование пространственно-временного состояния систем по геометрическим свойствам / VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012. Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: Сб. материалов в 3 т. Т.3. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 26–31.
10. Вовк И.Г. Системный анализ и моделирование пространственно-временного состояния технических систем // ГЕО-Сибирь-2008. Т.3: Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. Ч.2 : Сб. материалов IV Междунар. Науч. Конгр. «ГЕО-Сибирь–2008» 22–24 апр. 2008 г., Новосибирск. –Новосибирск: СГГА, 2008. – С. 132 – 135.
11. Вовк И.Г. Системно-целевой подход в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА: 2012. Вып. 2 (18). С. 115 – 124.
12. Вентцель Е.С. Исследование операций. –М.: Советское радио, 1972. – 522 с.
13. Вовк И.Г. Моделирование в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА: 2011. Вып. 1 (14). С. 69–75.
14. Вовк И.Г. Математическое моделирование в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА. Новосибирск: СГГА, 2012. Вып. 1 (17). –С. 94–103.
15. Вовк И.Г. Геометрическое моделирование линейных объектов в прикладной геоинформатике // Вестник СГГА. Новосибирск: СГГА, 2013. Вып. 4 (24). С. 94 – 103.

Принята к печати 6 августа 2014г.

Рекомендована кафедрой прикладной информатики и информационных систем СГГА

УДК 528:658.51

КАДАСТР, ЭКОНОМИКА И РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИЙ КАДАСТРОВЫХ КВАРТАЛОВ МЕГАПОЛИСА НА ОСНОВЕ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Аспирант А.В. Кудинова

Московский государственный университет геодезии и картографии
kudinovaav@gmail.com

Аннотация. Отражены вопросы комплексной оценки территорий. Рассмотрен пример процедуры факторного анализа для оценки территории по различным показателям в границах кадастрового квартала г. Москвы.

Ключевые слова: показатели оценки территории, территориальное управление, факторный анализ

Abstract. The issues of integrated assessment of areas are reflected. The example of the factor analysis for comprehensive assessment in the boundaries of a cadastral quarter of Moscow was considered.

Keywords: assessment of area, territory management, factor analysis

В настоящее время во многих крупных городах прослеживается интенсивное развитие и преобразование территорий. Вместе с тем, эффективное управление территориями не может осуществляться без соответствующей оценки происходящих изменений и выявления факторов, определяющих динамику таких изменений. В научных публикациях [1, 2] предлагаются различные методы решения задач комплексной оценки территории в рамках земельно-кадастрового направления. Однако качество оценки происходящих изменений в городской среде мегаполиса во многом зависит от создания актуальных информационных ресурсов, какими являются пространственные данные для управления недвижимостью в городе.

В предыдущей работе [3] была рассмотрена комплексная оценка территориальных единиц г. Москвы на основе 12-и показателей, характеризующих особенности развития городской среды. Но поскольку эти показатели были отобраны экспертным путём, возникла необходимость их дальнейшего изучения и более детального научного уточнения. Это проводилось для целей выявления показателей (групп показателей), оказывающих наибольшее влияние на изменение градостроительной ситуации в квартале. В данном случае, выбран

метод факторного анализа данных, поскольку его основная цель-выявление гипотетических факторов по большому числу статистических показателей [4].

Для проведения эксперимента была сформирована матрица наблюдений, отвечающая модели многомерного вектора, составляющие которого – суть характеристики городской территории, описывающих технические, экологические и другие параметры объекта наблюдений:

$$\mathbf{X}_i \{f_1, f_2, \dots, f_j\}_{r,t} \quad (1)$$

где $i=1,2,\dots,n$ — номер наблюдения; $j=1,2,\dots,m$ — номер характеристики объекта при условии $m \ll n$; f_m — числовые характеристики (параметры), описывающие признаки конкретного объекта; r, t — принадлежность (привязка) этих параметров к территории и временному интервалу наблюдений.

Изучение такой многопараметрической системы, образованной совокупностью многомерных векторов $\mathbf{X}_m$ в виде матрицы размерностью $m \times n$ можно свести к выявлению и исследованию некоторого количества явно или неявно существующих факторов F_k ($k < m$), характеризующих осредненный вектор признаков $\mathbf{X}_m$ в рамках известной модели компонентного (или факторного) анализа.

Как известно, условие ортогональности и ранжирование выделяемых факторов F_k приводит к модели метода главных компонент, в которой связь между наблюдаемым комплексом параметров вектора X и независимыми (гипотетическими) факторами F выражаются через матрицу факторной структуры:

$$X = \lambda V F, \quad (2)$$

где V — такая ортогональная матрица, что $V^T R V = \Lambda$; Λ — диагональная матрица собственных чисел корреляционной матрицы R вектора наблюдаемых переменных X .

В данной статье приведен результат проведенного факторного анализа предложенных ранее показателей оценки для цели снижения субъективизма при выборе группы показателей и выявления степени их влияния на конечный результат. Цель проводимого факторного анализа — сконцентрировать исходную информацию (вычисленные по числу исследуемых кварталов показатели оценки), чтобы выразить большое число рассматриваемых признаков (показателей оценки) через меньшее число более емких внутренних характеристик. При таком анализе число выделяемых факторов получается меньше, чем число обозначенных ранее исходных переменных. В результате проведения ряда математических преобразований [5] появляется возможность содержательной интерпретации данных и акцентирования внимания на скрытых закономерностях. Анализ проводился в компьютерной программе SPSS, которая является профессиональной программой для обработки статистической информации.

Необходимо отметить, что критерий проверки гипотез значимости собственных значений корреляционной матрицы основан на теореме распределения собственных значений этой матрицы. Учитывая изложенное, был использован достаточно известный тест для проверки гипотезы о близости распределений рассматриваемых совокупностей в m -мерном пространстве к сферическому, а именно некоррелированности параметров. Данный тест, который был предложен Бартлеттом [5], основан на представлении детерминанта матрицы корреляций генерализированной дисперсией распределения. Указанному критерию Бартлетта отвечает статистика:

$$\chi^2 = -[(n-1) - 1/6(2m+5)] \ln|R|. \quad (3)$$

Используя данные выборки для 46 исследованных кадастровых кварталов по 12 показателям полученным ранее нами в предыдущей работе [3], мы провели анализ этой выборки по методу факторного анализа в P -модификации (табл. 1).

Анализ распределения дисперсий по главным компонентам дает право оперировать четырьмя обобщенными факторами, поскольку доля дисперсии для всех четырех факторов от общей дисперсии составляет 71,1%, в том числе первого фактора — 23,5%; второго фактора — 17,00%; третьего фактора — 15,7 %; четвертого фактора — 14,7%. В табл. 2 представлено распределение факторных нагрузок по первым четырем главным компонентам. Первую компоненту в основном нагружают факторы, отражающие участки, поставленные на Государственный кадастровый учет (ГКУ); участки, занятые нежилыми зданиями; участки, находящиеся в федеральной собственности; участки, занятые жилыми домами. Вторая компонента нагружается факторами, отражающими участки, на которые выпущены

Таблица 1
Полная объясненная дисперсия наблюдений

Компонента f	Начальные собственные значения			Суммы квадратов нагрузок извлечения	
	Итого	Дисперсии, %	Кумулятивный, %	Итого	Дисперсии, %
1	3,249	27,073	27,073	3,249	27,073
2	2,280	18,998	46,071	2,280	18,998
3	1,590	13,253	59,324	1,590	13,253
4	1,409	11,743	71,067	1,409	11,743
5	0,994	8,284	79,351		
6	0,870	7,250	86,601		
7	0,482	4,015	90,616		
8	0,407	3,389	94,005		
9	0,324	2,704	96,709		
10	0,208	1,731	98,439		
11	0,141	1,176	99,615		
12	0,046	0,385	100,000		

Таблица 2
Анализ главных компонент

Компонента	Суммы квадратов нагрузок извлечения	Суммы квадратов нагрузок вращения		
	Кумулятивный, %	Итого	Дисперсии, %	Кумулятивный, %
1	27,073	2,825	23,546	23,546
2	46,071	2,051	17,092	40,638
3	59,324	1,889	15,738	56,376
4	71,067	1,763	14,691	71,067

Градостроительные планы земельных участков (ГПЗУ); участки свободные от застройки и от оформленных земельно-правовых отношений; участки, готовящиеся к постановке на ГКУ; участки, на которые ведутся разработка ГПЗУ. Третья компонента нагружается факторами, отражающими участки, характеризующиеся озелененностью (наличие на участках ПК и ООПТ). Четвертая компонента нагружается факторами, отражающими участки, предлагаемые к обременению условием совместного использования; и занятые объектами социального назначения.

Т а б л и ц а 3

Факторные нагрузки (после вращения факторов)

Компонента f	Компонента Λ			
	1	2	3	4
8	0,870			
5	0,808			
7	0,737			
4	-0,442	-0,407		
1		0,795		
3	-0,417	-0,689		
9		0,638		0,539
2		0,533		
12			0,914	
11			0,895	
10				0,779
6	-0,417			0,689

Учитывая данную классификацию по группам, можно охарактеризовать полученные компоненты, ссылаясь на [3], где дается полное обоснованное описание показателей оценки. Таким образом, проведенный компонентный анализ можно интерпретировать следующим образом, разделив показатели по четырем группам факторов:

первая — характеризует наличие на территории земельных участков определенного вида разрешенного использования и учтенных в кадастре недвижимости;

вторая — характеризует «предкадастровую» стадию формирования земельных участков. Она в основном отражает градостроительные условия функционирования рассматриваемой территории;

третья — отражает уровень ПК и ООПТ на рассматриваемой территории. Можно считать его экологической компонентой;

четвертая — характеризует значимость правовой компоненты, учитывая сервитуты и

объекты социального назначения.

Учитывая эти выводы, мы приходим к новой комплексной оценке состояния квартала по следующей формуле, где $0 \leq f \leq 1$. Для расчета новых показателей оценки территорий была принята средневзвешанная по четырем группам факторов формула с весами по каждой группе, равными «процентам дисперсии».

Таким образом, общая формула комплексной оценки «состояния» квартала выглядит следующим образом:

$$M(f, t) = \sum_{i=1}^{i=4} V_i \sum_{j=1}^{j=12} f_{i,j}. \quad (4)$$

На основании приведенного исследования предложенной системы показателей можно сделать вывод, что новая оценка должна более объективно отражать состояние территории на текущий момент времени в части градостроительной составляющей (компоненты). Без использования оценки динамики изменений в городской среде в комплексе с соответствующим современным инструментарием (каким являются ГИС-системы и, в частности, единое геоинформационное пространство г. Москвы), сложно проследить развитие территории, а также выявить взаимосвязь протекающих в ней процессов и степень их влияния друг на друга. Таким образом, данная оценка может быть использована при принятии решений в целях эффективного управления территориями. Кроме того, вопросы комплексной оценки территории, а в особенности крупного мегаполиса, каким является г. Москва, могут решаться с существенным сокращением временных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатенко А.А. Методы оценки качества городских территорий// Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». — 2013. — № 1. — С 84–86.
2. Ромм А.П. Методические основы оценки городских земель// Аудиторские ведомости. — 1999. — № 3. — С. 61–74.
3. Кудинова А.В. Методика оценки комплексного мониторинга территории города Москвы с использованием инструментальных средств геоинформационных систем ЕГИП г. Москвы// Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2013. — № 6. — С. 108–111.
4. Кудинова А.В. Классификация показателей комплексной оценки территорий кадастровых кварталов мегаполиса на основе факторного анализа данных// Евразийский союз ученых (№ V), Науки о земле, 2014. — С. 41.
5. Дубровский С.А. Прикладной многомерный статистический анализ. М.: Финансы и статистика, 1982. — 216 с.

Принята к печати 28 октября 2014 г.
Рекомендована кафедрой кадастра
и основ земельного права МИИГАиК

ХРОНИКА

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МИХАИЛА ДМИТРИЕВИЧА МАЛЬЦЕВА

Известный в СССР и за рубежом в 50–80 гг. XX в. оптик-расчетчик оптических систем профессор, доктор технических наук М.Д. Мальцев родился в многодетной семье крестьянина Воронежской губернии 14 ноября 1914 г. В шестнадцать лет он начал трудовую деятельность чернорабочим — реечником в геодезической партии на строительстве Сталинградского тракторного завода (СТЗ). После окончания фабрично-заводского училища (ФЗУ) на рубеже 1920–1930 годов трудился токарем в ремонтном цеху СТЗ, изготавливая ответственные детали без чертежей и техпроцессов за неимением оных. В случае брака детали это было чревато обвинением во вредительстве в период коллективизации и «обострения классовой борьбы».

В 1933–1934 гг. М.Д. Мальцев уехал в Москву и работал в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) токарем 6-го разряда. В 1935 г. был переведен техником на завод «Фрезер». С направлением и ходатайством завода «Фрезер» его принимают в 1935 г. на учёбу в МИИГАиК. Он учился вместе с будущими профессорами МИИГАиК Д.А. Романовым и А.С. Дубовиком. Дипломную практику в качестве техника-дипломанта проходил в Московском институте мер и измерительных приборов. После защиты дипломной работы работал в этом институте инженером, старшим инженером и заместителем начальника технического отдела.

В начале Великой Отечественной войны из-за туберкулеза легких М.Д. Мальцев был признан негодным к службе в армии и занимался разработкой чертежей и техпроцессов изготовления различных типов взрывателей к снарядам зенитных орудий. В 1943 г. по приказу Наркомата вооружения М.Д. Мальцева переводят на должность старшего инженера в Центральную измерительную лабораторию Красногорского меха-



нического завода.

Известно, что во время Великой Отечественной войны в 1942 г. на заводе начали выпускать снайперские оптические прицелы типа ПУ по чертежам другого завода, находившегося в эвакуации в Сибири. При изготовлении пружины механизма перемещения прицельной марки до 70% деталей шло в брак. М.Д. Мальцев по своей инициативе внес изменения в чертеж и в технологию изготовления пружины. Он организовал изготовление опытной партии пружин практически при 99% выпуске годных деталей. Однако специальная комиссия пыталась обвинить его во вредительстве в военное время с соответствующими последствиями. Главный инженер завода С.А. Зверев разобрался в этом деле и объявил благодарность М.Д. Мальцеву в виде дополнительной ежедневной тарелки супа, состоявшего в большей части из капусты и меньшей из карто-

феля и, конечно, без мяса. Прицелов было выпущено за годы войны более 58 тыс. штук.

В 1944–1947 гг. М.Д. Мальцев учился заочно в аспирантуре МИИГАиК со специализацией по расчётам оптики под руководством профессора Б.В. Фефилова и успешно защитил диссертацию с присвоением звания кандидат технических наук.

В августе 1947 г. директор завода Дмитрий Францевич Скаржинский издал приказ №127 об организации Центрального конструкторского бюро (ЦКБ), в составе которого было создано оптико-вычислительное бюро, затем Оптическое конструкторское бюро (ОКБ). Д.Ф. Скаржинский в 60 гг. XX в. по просьбе М.Д. Мальцева преподавал на кафедре технологии в МИИГАиК.

На заводе в связи с увеличением выпуска фотоаппаратуры возникла необходимость создания светосильного технологичного фотообъектива и была поставлена задача создать такой объектив на базе трофейного немецкого объектива «Зоннар» (Sonnar) с фокусным расстоянием 5 см и относительным отверстием 1:2. Этот объектив изготовлялся на заводе из немецкого стекла по немецкой технологии с помощью немецких специалистов, среди которых был оптик доктор-инженер профессор Тыдикин Р., так его называли по-русски, (Tiedeken R). Было известно, что трофейное стекло заканчивается, а специалистов И.В. Сталин обещал в скором времени отпустить домой.

Сотрудник оптико-вычислительного бюро кандидат технических наук М.Д. Мальцев к удивлению отечественных и немецких специалистов-оптиков пересчитал на отечественные марки стекол с учетом технологии производства завода объектив «Зоннар» и тем самым открыл дорогу массовому производству фотообъективов типа «Юпитер», а также указал пути создания светосильных объективов различного назначения. Работа М.Д. Мальцева и группы молодых специалистов опередила подобные исследования Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ). Это вынуждены были признать и известные оптики ГОИ и СССР, такие как доктора физико-математических наук профессора Д.Ю. Гальперн и Г.Г. Слюсарев, а также будущий доктор технических наук профессор Д.С. Волосов — постоянный оппонент Мальцева.

После выполнения этой работы и изготовления объектива ЗК (Зоннар Красногорский) начальником ОКБ по приказу директора завода №139 от 15 августа 1948 г. был назначен М.Д. Мальцев, в будущем доктор технических наук профессор МИИГАиК, Сравнительные испытания объективов «Зоннар» и ЗК ($F' = 5$ см

1:2), проведенные в наше время на современном оборудовании кандидатами технических наук И.Р. Осиповичем и Н.М. Мальцевым, показали что объектив ЗК практически не уступает по качеству изображения объективу «Зоннар».

В период с 1949 по 1952 гг. М.Д. Мальцев работает по совместительству старшим преподавателем Академии оборонной промышленности в г. Кунцево Московской области, которая была, как тогда говорили, кузницей кадров руководителей оптической промышленности.

Под руководством М.Д. Мальцева и при его непосредственном участии совместно с сотрудниками ОКБ Г.И. Евсеевой (выпускник МИИГАиК 1948 г.), З.М. Орловой, М.И. Двойниковым (выпускник МИИГАиК 1958 г.), и другими были разработаны и производились для фотоаппаратов «Зоркий» объективы типа «Индустар»: И-22М, И-26, И-50, И-61, И-63; семейства «Юпитер»: Ю-3, Ю-8, Ю-9, Ю-11, Ю-12, Ю-17; для фотокамеры «Москва-5» — И-24; для фотокамеры «Зенит» — Ю-21 со знаком качества; для кинокамеры «Кварц» — Ю-24; для кинокамеры «Красногорск» — Вега-9 и многие другие.

Совместно с Екатериной Михайловной Модновой (однокурсница М.Д. Мальцева) М.Д. Мальцевым была создана и внедрена система, в виде различных руководств по конструированию, обеспечивающая оптимизацию допусков на изготовление оптических деталей и сборок и положившая начало заводскому объективостроению. Эти работы М.Д. Мальцева широко известны среди специалистов-оптиков и в нашей стране и за рубежом, включая Китай и США.

М.Д. Мальцев без преувеличения был более 20 лет единственным в Москве известным специалистом по расчету сложных оптических систем и пользовался большим авторитетом в том числе и в министерстве оборонной промышленности, особенно в дискуссиях с ГОИ им. С.И. Вавилова по проблемам разработки и производства фотообъективов различного назначения.

Как известно, долгое время расчеты оптических систем проводились вручную с помощью тригонометрических таблиц Иордана или на немногих трофейных электрических вычислительных машинах «Мерседес» (Mercedes) и на отечественных механических арифмометрах типа «Феликс». Это был кропотливый, ответственный и невысоко оплачиваемый труд. И лишь в конце 1950-х годов по инициативе М.Д. Мальцева была приобретена электронно-вычислительная машина «Урал-1» и организовано расчетное подразделение, которым руково-

дил фронтовик, танкист, орденосеца Михаил Иванович Двойников, в дальнейшем кандидат технических наук. Много сил отдал внедрению и обслуживанию вычислительной техники Валерий Иванович Паутов.

В ОКБ много лет работала опытный специалист Александра Николаевна Шуваева (Толокнова), которая часто не только советовалась с М.Д. Мальцевым, но и критиковала его указания. Под руководством и при непосредственном участии А.Н. Шуваевой разработаны оптические системы изделий гражданского и специального назначения, таких как ТПК; Т-2С; ТКН; ТПД-2; «Рубин»; 1ОП2; 9Ш19; ТПД-К; «Пума»; «Свет-2»; «Стилет»; «Радуга Ф» и многих других.

В отделе говорили:

«Если в оптике увяз, то поможет Кривовяз (специалист-измеритель).

Ну, а если он не сможет,

То Шуваева поможет».

Однако были известны и другие вирши:

«Луч не прошел — попал в оправу, пойду домой приму отраву».

Применив репродукционные объективы с повышенным разрешением, разработанные А.Н. Шуваевой и Г.И. Евсеевой под руководством М.Д. Мальцева, лаборатория шкал и сеток ЦКБ (в настоящее время НТЦ) при непосредственном участии Георгия Михайловича Наумченко стала практически монополистом в производстве различного рода кодовых дисков, печатных плат, шкал, мир и тест-объектов. Это дало возможность удовлетворять потребности даже других предприятий отрасли и выполнять, например, заказы Центрального телевидения нашей страны при переходе на цветное телевидение. Разработанные объективы превосходили подобные системы, рассчитанные в ГОИ им. С.И. Вавилова и позволили отказаться от импортных изделий.

М.Д. Мальцевым совместно с Г.И. Евсеевой были разработаны объективы «Телемар-22» и «МТО-500», с помощью которых впервые в мире была сфотографирована обратная сторона Луны.

Важной вехой были работы М.Д. Мальцева, Л.А. Масленникова и А.Н. Шуваевой по расчётам допусков и требований к сложным оптическим системам КФТ, КТ-50, КТС, ВАУ, АФА и других, что обеспечило их практически безболезненное изготовление в опытном и серийном производстве. Кинотеодолиты КФТ, КТ-50, КТС, разработанные под руководством Главного конструктора Лауреата Ленинской и Государственной премий, Героя Социалистического Труда Федора Евгеньевича Соболева, были установлены в

1950–1960 гг. на полигонах и испытательных трассах страны. С помощью этих приборов определялись траектории баллистических ракет, контролировался запуск искусственных спутников Земли и космических кораблей.

Были в производственной деятельности М.Д. Мальцева и критические моменты и, в том числе, наличие семи выговоров (из них три строгих). Однако по приказу министра С.А. Зверева он был направлен на Международную ярмарку в г. Лейпциг (Германия) в 1959 г., в качестве стендиста, демонстрировать достижения отечественной оптической промышленности. Н.С. Хрущев, посетивший ярмарку, остался доволен нашим превосходством над американской фототехникой в то далекое время.

В своей деятельности на заводе М.Д. Мальцев отвечал практически за выпуск всех типов объективов на всех этапах их производства, а также за оптические тракты всех других изделий. Он был, можно сказать, Главным оптиком завода в 50-х годах, хотя эта должность появилась позднее и первым Главным оптиком был Евгений Иванович Дикань.

Напряженность производственных отношений в то время может отразить такой факт. М.Д. Мальцев на совещаниях у директора завода любил улыбаться, при этом директор в резкой форме спрашивал его о причине улыбок. Мальцев обычно отвечал, что у него все производственные проблемы решены и все в порядке. На это директор заявлял: «А почему у них (у начальников других подразделений и цехов) все плохо?».

М.Д. Мальцев, в качестве начальника ОКБ, много внимания уделял нуждам и проблемам коллектива: он перевел нескольких техников в инженеры с соответствующим повышением заработной платы, матерям-одиночкам «пробивал» комнаты (квартиры в то время были редкостью), участвовал в спортивных мероприятиях и по отзывам «специалистов» неплохо играл в футбол и бегал на лыжах. Строительство домов на Брусчатом поселке также не обошлось без его участия. Вместе с другими начальниками ЦКБ он часто бывал «героем» карикатур в стенной газете ЦКБ, что в те времена было обычным явлением.

М.Д. Мальцев любил музыку и с удовольствием слушал пьесы Моцарта и Бетховена, вальсы Штрауса, неаполитанские мелодии и марши в исполнении на фортепиано сыновей Игоря и Николая, будущих кандидатов технических наук. Его жена Зинаида Ивановна Мальцева (Рамодина) с довоенного времени работала на заводе в качестве цехового технолога и инженера-

измерителя и много сил вложила в поддержание здоровья мужа и детей.

М.Д. Мальцеву приходилось много работать и даже конфликтовать со службой методов и средств исследований оптических систем в виде Научно-исследовательского отдела (НИО), возглавляемого Иваном Афанасьевичем Турыгиным, впоследствии профессором МВТУ им. Н.Э. Баумана, которого работавшие на заводе после войны немецкие специалисты называли «господин профессор» за его великолепное знание оптики. НИО сыграло важную роль в разработке и производстве оптических приборов на заводе и в оптической промышленности нашей страны. Первым руководителем оптотехнической лаборатории в составе НИО был известный специалист по оптическим измерениям кандидат физико-математических наук Леонид Маркович Кривовяз, с которым долго и плодотворно сотрудничал М.Д. Мальцев.

Высокий авторитет оптиков ЦКБ позволял М.Д. Мальцеву, И.А. Турыгину и А.Н. Шуваевой неоднократно ходатайствовать перед руководством завода о повышении расценок на расчеты оптики и зарплат сотрудникам. На приемах в министерстве М.Д. Мальцев удостоивался первого рукопожатия министра оборонной промышленности Сергея Алексеевича Зверева в присутствии удивленных руководителей завода и ЦКБ.

Развитие ОКБ под руководством М.Д. Мальцева, А.Н. Шуваевой, Е.М. Модновой, Г.И. Евсеевой и Л.Я. Потёмкиной и организация расчетно-оптотехнического отделения под руководством В.Н. Шпачинского, Л.М. Кривовяза и М.А. Знаменской, а также появление плеяды молодых оптиков-расчетчиков, таких как Е.К. Кобозев, Л.А. Масленников, В.В. Позжаков (выпускники МИИГАиК), Ю.Ф. Юрченко, в дальнейшем доктор технических наук, Л.А. Качарава, кандидаты технических наук И.С. Тимофеев, М.И. Двойников и А.А. Токарев, ознаменовало переход к самостоятельности по расчету оптических систем и сложных объективов для всех тематических направлений.

Технический уровень любого оптического прибора в первую очередь определяется, как известно, качеством и возможностями его оптической системы, и сотрудники ОКБ ЦКБ по-

казали, что по своей квалификации и возможностям они не уступают специалистам ГОИ им. С.И. Вавилова. Это неоднократно признавали не только видные ученые оптики доктора физико-математических наук профессора Д.Ю. Гальперн и Г.Г. Слюсарев, доктора технических наук профессора Д.С. Волосов и М.М. Русинов, а и рядовые оптики-расчетчики ГОИ.

В результате больших разногласий с новым руководством ЦКБ М.Д. Мальцев в 1962 г. был вынужден уйти на должность заместителя начальника механического цеха и тем самым вспомнить «токарную» юность.

В 1963 г. М.Д. Мальцев перешел на преподавательскую работу в МИИГАиК, где он работал по совместительству ассистентом кафедры прикладной оптики с 1952 г.

За время работы в МИИГАиК М.Д. Мальцевым подготовлено много специалистов оптической промышленности. Некоторые студенты и преподаватели были недовольны его методами работы и неоднократно ходили жаловаться ректору института В.Д. Большакову. Ректор, однако, отдавая должное достижениям М.Д. Мальцева в выполнении научно-хозяйственных планов института, прогонял «ходоков».

По результатам работ М.Д. Мальцевым были написаны книга «Расчет допусков на оптические детали», пользующаяся успехом в нашей стране и за рубежом и в соавторстве с Г.А. Каракулиной учебник «Прикладная оптика и оптические измерения», а также опубликовано большое число научных статей и брошюр методического характера.

Последователями и учениками доктора технических наук, профессора М.Д. Мальцева считают себя такие московские специалисты по расчету оптических систем как доктор технических наук Ю.Ф. Юрченко, Д.Т. Пуряев и С.Н. Бездидько.

М.Д. Мальцев награжден медалями «За оборону Москвы», «800-летия Москвы» и малой серебряной медалью ВДНХ.

До семидесятипятилетнего возраста М.Д. Мальцев работал в институте и даже в весьма преклонные годы продолжал интересоваться жизнью нашей страны, а также написал воспоминания о своей производственной деятельности и людях, которые помогали ему жить и работать.

*Мальцев Николай Михайлович,
кандидат технических наук (сын М.Д. Мальцева)*

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЯКОВА МОИСЕЕВИЧА ИВАНДИКОВА

20 ноября 2014 года исполнилось 100 лет со дня рождения одного из ведущих профессоров Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), доктора технических наук, Заслуженного изобретателя РСФСР Ивандикова Якова Моисеевича.

Вся творческая и трудовая деятельность Якова Моисеевича была направлена на служение Отечеству и укрепление его обороноспособности.

Сын крестьянина из села Еловец Хотимского района Могилёвской области, он начал свой трудовой путь в 15-летнем возрасте слесарем-механиком на заводе им. Свердлова в Ленинграде. Отсюда он был направлен по комсомольской путёвке в Ленинградский техникум оптики и механики. По окончании техникума в 1935 г. получил направление на московское предприятие «Геофизика». На этом предприятии он проработал до 1961 г., пройдя путь от техника-конструктора до начальника лаборатории и главного конструктора. Под его руководством и при его непосредственном участии в этот период были разработаны и созданы новые приборы, имеющие важное оборонное и народно-хозяйственное значение. В этот период, не прерывая трудовой деятельности, он окончил в 1940 г. ВВИА им. Н.Е. Жуковского. Во время финской и Великой Отечественной войн неоднократно командировался на фронт в действующую армию для оказания помощи авиационным частям в освоении спецприборов (прицельных устройств типа ОПТ-1Р, ПЛ-2 и других для штурмовиков и бомбардировщиков). За боевые заслуги награждён орденами Отечественной войны I и II степени, орденом Красной Звезды и несколькими медалями. После войны Яков Моисеевич закончил Академию промышленности вооружений (1953 г.) и ВЗМИ (1954 г.). В 1956 г. он защитил кандидатскую диссертацию.

В МИИГАиК Я.М. Ивандиков пришёл работать в 1959 г., сначала – по совместительству, затем с 1961 г. продолжил работу в качестве доцента, а с 1976 г. – профессора до своей кончины в 2004 г. Деятельность его была связана с кафедрами «Приборостроения», «Оптико-механических приборов», «Электротехники, автоматика и электроники», «Информационно-измерительных систем».

Я.М. Ивандиков — один из основателей факультетов оптического приборостроения и прикладной космонавтики. Он поставил ряд новых курсов, таких, как «Счетно-решающие устройства», «Вычислительная техника и автоматика», «Проектирование оптико-электронных приборов наведения и ориентации», «Космическая навигация», «Аппаратное обеспечение спутниковых методов» и др.

Я.М. Ивандиков — ведущий специалист в нашей стране по оптическому приборостроению. В 1974 г. он защитил докторскую диссертацию, автор более 30 изобретений, опубликовал свыше 90 научных трудов, в том числе пять монографий и два учебника. Сфера научных исследований — теория и практика космической геодезии, разработка геодезического обеспечения ракетно-стартовых комплексов.

За большие заслуги перед Отечеством в 1994 г. Я.М. Ивандиков был награждён орденом «Почёта». Он также награждён многими почётными дипломами и медалями, в том числе медалями им. А.С. Попова и Ю.А. Гагарина.

За 40 лет своей научно-педагогической деятельности Я.М. Ивандиков подготовил более 1000 высококвалифицированных специалистов в области оптико-электронного приборостроения. Яков Моисеевич воспитал десятки кандидатов и докторов технических наук. Среди его учеников президент МИИГАиК, дважды герой Советского Союза, лётчик-космонавт СССР, профессор, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, академик Международной академии космонавтики, Российской инженерной академии, Международной Академии информатизации, президент Ассоциации российских ВУЗов Виктор Петрович Савиных, ректор МИИГАиК, профессор, доктор технических наук Андрей Александрович Майоров и др.

Профессор Я.М. Ивандиков вписал славную страницу в историю МИИГАиК. Его ученики достойно продолжают дело, которому он посвятил свою жизнь.



К 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ФЕДОРА ВАСИЛЬЕВИЧА ДРОБЫШЕВА



Федор Васильевич Дробышев родился 6 июля 1894 г. в семье священника в станице Щелкозаводская Тверской области на Кавказе.

Федор Васильевич входит в плеяду отечественных ученых-фотограмметристов, заложивших основы российской фотограмметрии и развивавших ее в течение XX века. Им разработаны конструкции разнообразных фотограмметрических приборов, которые облегчили труд топографов и фотограмметристов и ускорили картографирование территории нашей страны. Среди этих разработок следует отметить: знаменитую координатную линейку, позволившую быстро наносить на планшет координатную сетку; топографический стереометр, прибор для съемки рельефа по аэроснимкам в камеральных условиях; стереограф, ускоривший создание крупномасштабных топографических карт.

Свои «Воспоминания на фоне автобиографии», написанные в 1970-е годы, Федор Васильевич передал в дар институту и они хранятся в музее МИИГАиК. Экземпляр этих воспоминаний внука и правнучка Федора Васильевича Валерия Владимировна и Наталья Николаевна Володиных передали кафедре фотограмметрии.

В 2014 году вышла книга «Федор Васильевич Дробышев. Воспоминания». Книга состоит из двух частей — монографии Ф.В. Дробышева «Воспоминания на фоне автобиографии» и воспоминаний о самом Федоре Васильевиче его близких, друзей и учеников.

11 декабря в зале Ученого Совета МИИГАиК состоялось организованное кафедрой фотограмметрии торжественное собрание, посвященное 120-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, Лучшего изобретателя геодезии и картографии, Лауреата Сталинской (Государственной) и Ленинской премий, доктора технических наук, профессора, кавалера орденов Св. Анны 4-й ст., Трудового Красного знамени и Ордена Ленина, участника Первой мировой войны — Федора Васильевича Дробышева.

Присутствовали Ректор университета А.А. Майоров, внука и правнучка Ф.В. Дробышева, представители МГУ и многих других организаций. Заслушали доклад об основных разработках Ф.В. Дробышева (докладчик профессор Б.В. Краснопевцев), воспоминания об Ф.В. Дробышеве и его отце (докладчик В.В. Володина — внука).

Была организована экскурсия по музею МИИГАиК.



АЛФАВИТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ
ИЗВ. ВУЗОВ «ГЕОДЕЗИЯ И АЭРОФОТОСЪЕМКА» В 2014 Г.

Разделы, авторы и названия статей **№ стр.**

АСТРОНОМИЯ, ГРАВИМЕТРИЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Авзалов И.З. Остаточная погрешность рефракции при астрометрической редукции в дневных условиях наблюдения.....	2	32
Авзалов И.З. Оценка погрешности морских астрометрических измерений координат в дневных условиях наблюдения.....	4	13
Бабич О.А. Приведение измерений акселерометров к центру инерциального блока в задачах авиационной гравиметрии	2	51
Бондаренко С.С. Зависимые измерения в глобальных радионавигационных системах	2	60
Дементьев Ю.В., Каленицкий А.И., Карпик А.П., Середович В.А. О полной топографической редукции силы тяжести	3	13
Дроздов Н.Д. К доказательству центральной теоремы гравитики.....	5	3
Дроздов Н.Д. Спутниковое позиционирование, гравитика и глобальная геодезия.....	6	9
Кащеев Р.А., Новлянская И.О. Сравнение и оценка точности современных моделей гравитационных потенциалов Луны и Марса	6	3
Козлова Н.А., Карачевцева И.П., Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Конопихин А.А., Коханов А.А., Патратий В.Д., Гаров А.С., Абдрахимов А.М., Оберст Ю. Новая цифровая обработка архивных лунных панорам для целей крупномасштабного картографирования и геоморфологического анализа поверхности Луны	2	11
Майоров А.А., Непоклонов В.Б., Куприянов А.О., Давлатов Р.А., Мацкин Е.Л., Рождественский Д.А. Экспериментальные исследования влияния ионосферных эффектов на спутниковые определения	4	7
Нейман Ю.М., Сугаипова Л.С. Об адаптации глобальной модели геопотенциала к региональным особенностям (часть 1)	3	3
Нейман Ю.М., Сугаипова Л.С. Об адаптации глобальной модели геопотенциала к региональным особенностям (часть 2)	4	3
Непоклонов В.Б., Лидовская Е.А., Спесивцев А.А. Оценка качества моделей гравитационного поля Земли	2	24
Савиных В.П., Васильев В.П., Капранов Ю.С., Краснорылов И.И., Куфаль Г.Э., Перминов С.В., Шевченко В.В. К вопросу о создании Лунной базы	2	3
Сугаипова Л.С. О гармоническом анализе по результатам спутниковой градиентометрии.....	2	19
Тиссен В.М. Методика высокоточного прогнозирования неравномерностей вращения Земли	2	44

ГЕОДЕЗИЯ

Антонович К.М., Ганагина И.Г., Косарев Н.С., Косарева А.М. О надежности сетей постоянно действующих базовых станций	4/С	30
Астащенко Г.Г., Горохова Е.И. Определение и анализ деформационных характеристик тоннелей в программном комплексе MatLab	4/С	12
Барбанова Л.П. Алгоритм подводной акустической навигации	3	17
Барбанова Л.П. Алгоритм местоопределения с помощью GNSS для произвольной модели атмосферы.....	4	36
Бесимбаева О.Г., Хмырова Е.Н., Бесимбаев Н.Г. Анализ точности инструментальных наблюдений.....	5	15
Бугакова Т.Ю. Определение пространственно-временного состояния систем по результатам многократных геодезических измерений	2	67
Бугакова Т.Ю., Борисов Д.А., Яковлев Д.А. Программная реализация метода Делоне для определения формы и размеров техногенных объектов по геопространственным данным	4/С	15

Голыгин Н.Х., Комаров Д.Д., Лысенко В.Г., Непоклонов В.Б. Поверка и калибровка лазерных трекеров и наземных сканеров на универсальном комплексе эталонов сложных координатных измерений УМК-М МИИГАиК	1	22
Гуляев Ю.П., Хорошилов В.С., Лисицкий Д.В. О корректном подходе к математическому моделированию деформационных процессов инженерных сооружений по геодезическим данным	4/С	22
Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Смирнов А.П., Баюк О.А., Шкурко В.М. Проблемы мониторинга эксплуатационной надёжности и безопасности грунтовых плотин	4	26
Жослин М. ЙЕССУФУ Определение взаимосвязи национальной системы координат Республики Бенин DATUM 58(81) с общеземной ITRF 2008	5	10
Ишутина А.С. Исследование закономерностей формирования осадок инженерных сооружений методом многофакторного корреляционного анализа	4	32
Канашин Н.В., Виноградов К.П., Степанов Д.И. Оценка возможности применения современных наземных лазерных сканеров для топографической съемки	1	34
Карпик А.П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий	4/С	3
Карпик А.П., Гиенко Е.Г., Косарев Н.С. Анализ источников погрешностей преобразования координат пунктов спутниковых геодезических сетей	4/С	55
Колмогоров В.Г., Басаргин А.А. Определение крена плиты фундамента инженерного сооружения с помощью тренд-анализа и ГИС-технологий	4/С	19
КОССУГБЕТО Патрик Б.К., ЙЕССУФУ Жослин М. Определение параметров преобразования между плоскими координатами на территории Республики Бенин	4	30
Кошелев А.В. Определение показателя преломления оптических волн в атмосфере по результатам светодальномерных измерений эталонного базиса	5	7
Кроличенко О.В. Методика наблюдений за деформациями инженерных сооружений специального назначения	6	27
Кузьмич А.И., Богданов С.С. Исследования влияния вибраций на современные цифровые нивелиры	1	18
Мазуров Б.Т., Куттыкадамов М.Е. Моделирование динамики вантовых мостов по геодезическим наблюдениям (теоретические основы)	4/С	37
Мазуров Б.Т., Зарзура Ф.Х., Эссаи Али М.Х. Прогнозные модели динамики вантовых мостов по данным ГНСС	4/С	40
Малинников В.А., Малинникова Е.В., Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Фрактальная геометрия геодезических линий	1	3
Маркузе Ю.И., Ямбаев Х.К. Структурная схема мониторинга и алгоритм анализа деформаций земной коры по результатам спутниковых измерений на пунктах региональных референцных сетей	6	30
Никонов А.В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины	1	28
Огородова Л.В. Простой и надежный способ вычисления геодезической широты и высоты точек поверхности Земли по прямоугольным координатам	2	63
Патрик Б.К. КОССУГБЕТО, Жослин М. ЙЕССУФУ Современное состояние координатной основы Республики Бенин	1	38
Патрик Б.К. Коссугбето. Проект сгущения и оценка точности координатной основы Республики Бенин	3	20
Савиных В.П., Ямбаев Х.К. Геодезия – древнейшая фундаментальная и прикладная наука об исследовании Земли и её физических полей	6	16
Середович В.А., Сучков И.О. Об опыте исследования способа измерения расстояний в комбинациях на эталонном базисе	4/С	62
Середович В.А., Радченко Л.К. Мониторинг и анализ технического состояния трубопроводов нефтегазового комплекса по данным геодезическо-маркшейдерских измерений и методов геоинформационного картографирования	4/С	66
Уставич Г.А., Сальников В.Г., Рябова Н.М. Технологическая схема геодезических работ при монтаже турбоагрегатов	4/С	45
Уставич Г.А., Сальников В.Г., Рябова Н.М. Схема полевого высотного станда для поверки системы «цифровой нивелир – штрих-кодовые рейки»	4/С	51

Федосеев Ю.Е., Лебедев С.В., Куприянов А.О., Кузнецов С.П. Обоснование разработки методики реконструкции местных систем координат на территориях городов и высокоурбанизированных районов с использованием спутниковых методов.....	1	13
Ходаков П.А., Басманов А.В. О состоянии геодезических пунктов в секторе Российской Арктики (на примере морей Лаптевых и Восточно-Сибирского)	4	21
Чибириков В.К., Староверов В.С., Никитенко К.А. Комплексный подход к определению геодезическими методами напряженно-деформированного состояния магистрального газопровода	5	18
Шеховцов Г.А., Шеховцова Р.П. Новые способы формирования и использования вертикальных референтных прямых.....	6	22
Ямбаев Х.К., Горохова Е.И. Мониторинг деформаций тоннелей методом наземного лазерного сканирования	4/С	7

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

Алтынов А.Е., Батаев М.С., Гаврюшин Н.М., Дрыга Д.О. Методика оценки работы инерциальных систем и систем горизонтирования БЛА с использованием стенда, имитирующего условия полета	5	30
Антипов И.Т. Заключительный контроль процедуры уравнивания фототриангуляции	4/С	70
Безменов В.М. Применение кватернионов в фотограмметрии	5	22
Замишин В.В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений.....	1	43
Зверев А.Т., Фисенко Е.В. Специфика получения данных с беспилотного летательного аппарата ..	5	27
Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Патратий В.Д., Митрохина Л.А., Коханов А.А., Карачевцева И.П., Оберст Ю. Создание базы геоданных изображений для оценки изученности поверхности спутника Юпитера Ганимед по данным миссий Галилео и Вояджер-1,-2	6	37
Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Дешифрирование стереоскопической модели местности	6	42
Коркин В.С., Червова А.Е. Разработка алгоритма и методики создания маршрута макетных цифровых аэроснимков с подпиксельной точностью	1	51
Молчанов А.С., Лузянин С.И., Кононенко Е.В. Оценка фотографических изображений с помощью колориметрического показателя качества при проведении летных испытаний аэрофотосистем	1	57
Никитин В.Н., Семенов А.В. Калибровка камер по снимкам плоского тест-объекта	2	71
Перес Вальдез Мануэль де Хесус. Экспериментальные исследования фотограмметрической технологии создания обмерных чертежей и трехмерных моделей памятников истории и архитектуры по материалам плановой и перспективной крупномасштабной аэрофотосъемки	2	81
Трубина Л.К., Дубовик Д.С. Реализация 3D-визуализации стереопар изображений в электронных учебных пособиях	4/С	73
Эдгар Рубен Монтель Андраде. Экспериментальные исследования методики мониторинга состояния прибрежной полосы по материалам аэрофотосъемки	3	24

КАРТОГРАФИЯ

Алексеев Н.А., Медведев А.А. Возможности картографирования антропогенного влияния на особо охраняемые природные территории	4	52
Алексеев Н.А., Медведев А.А., Михайлова Т.В. Изучение геохимического влияния Губкинского-Старооскольского промышленного комплекса на заповедные экосистемы «Ямской степи».....	6	58
Батуев А.Р., Цыдыпова М.В., Борхонов В.А. Геоинформационное картографирование редких видов сосудистых растений и растительных сообществ особо охраняемых природных территорий.....	1	73
Верхотуров А.А. Математическая основа карт комплексного геоэкологического атласа Сахалинской области	6	54
Гук А.П., Дышлюк С.С., Женибекова А.Б. Проблемы автоматической генерализации при тематическом картографировании в среде ГИС	4/С	97

Дышлюк С.С., Асылханова Ж.А. Геоинформационное картографирование опасных зон при стихийных бедствиях (на примере Республики Казахстан)	3	27
Жукова О.Ю., Ковалева О.В., Гедз Л.В. Оценка качества изображения рельефа на электронных картах	1	60
Жукова О.Ю., Гедз Л.В. Оценка качества изобразительных свойств электронных карт на примере туристских	5	33
Зятыкова Л.К., Кнауб А.А., Колесников А.А., Комиссарова Е.В. Картографирование в многопользовательском режиме чрезвычайных ситуаций	4/C	108
Косарева А.М. Применение метода равновеликих трапеций для создания зоологических карт	1	70
Коханов А.А., Креславский М.А., Карачевцева И.П. Создание глобальной карты параметров рельефа Луны по современным данным дистанционного зондирования КА LRO	5	38
Кравцова В.И., Проворова И.А. Исследование и картографирование динамики дельты Куры по космическим снимкам	3	32
Креславский М.А., Коханов А.А., Карачевцева И.П. Картографирование топографической шероховатости северного полушария Меркурия по данным лазерной альтиметрии миссии Мессенджер	6	48
Крылов С.А., Дубровина С.В., Плотников И.В. Создание цифровых картографических основ автонавигационных карт	4	46
Кушнырь О.В. Разработка методики определения плотности населения по ночным снимкам DMSP OLS	1	66
Лисицкий Д.В., Колесников А.А., Комиссарова Е.В., Бугаков П.Ю., Писарев В.С. Мультимедийное направление в картографии	3	41
Лисицкий Д.В., Кикин П.М. Методические основы веб-картографии	4/C	85
Лисицкий Д.В., Хорошилов В.С., Колесников А.А. Анимационная картография – сущность, характеристики и перспективы	4/C	91
Мазуров Б.Т., Ромашова Л.А., Николаева О.Н., Волкова О.А. Радиоэкологическое картографирование окружающей среды и некоторые тенденции его развития	4/C	104
Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Обзор изданий картографических материалов в Сахалинской области	5	48
Нырцов М.В. История картографирования малых тел солнечной системы	4	40
Пластинин Л.А., Дышлюк С.С., Николаева О.Н., Ромашова Л.А. Роль экологических карт в формировании инфраструктуры пространственных данных муниципального уровня	4/C	101
Ромашова Л.А. Картографирование состояния водных объектов на основе комплексной оценки качества воды	4	58
Уставич Г.А., Молокина Т.С., Комиссарова Е.В. Многофункциональная учебно-ориентированная карта – новый вид картографического произведения для высшей школы	4/C	78
Утробина Е.С., Матерук А.Ю. Некоторые вопросы становления навигационной картографии	5	43
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ		
Белова Е.И. Анализ временных серий безоблачных изображений местности для оценки динамики растительности на вырубках по спутниковым данным Landsat TM/ETM+	2	92
Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В. Закономерность предвестниковой динамики линеаментов, регистрируемых из космоса, при землетрясениях	1	89
Веревошкин Ю.Г., Ильин Ю.А., Малинников В.А., Престон Н.Е. Моделирование тепловых ИК-изображений земных ландшафтов	6	82
Воробьев В.Е., Замишин В.В. Экологические проблемы арктических регионов и возможности их решения на основе результатов космического мониторинга	5	54
Горохова И.Н., Борисочкина Т.И., Шишконокова Е.А. Исследование городских экосистем на основе материалов дистанционного зондирования	2	100
Денисевич Е.В., Кожина Л.Ю., Филатов Д.М. Применение данных дистанционного зондирования Земли для оценки негативного воздействия термокарстового процесса на объекты нефтегазодобычи	3	56
Зверев А.В. Сравнение результатов линеаментного анализа космического снимка и цифровой модели рельефа	2	96

Зверев А.Т., Фисенко Е.В., Горохова И.Н. Изучение почвенно-растительного покрова городских экосистем по материалам с беспилотного летательного аппарата и космическим снимкам высокого разрешения	3	52
Коновалов Л.А., Чекарева Н.М. Использование ГИС-технологий для оценки состояния природной среды на примере Бородинского поля на основе данных ДЗЗ	1	83
Лазарев Е.Н., Баскакова М.А., Гусакова Е.Н., Жуков Д.М., Коханов А.А. Сравнительный анализ данных активного дистанционного зондирования для картографирования форм рельефа планет и спутников Солнечной системы	2	84
Малинников В.А., Никольский Д.Б., Савиных В.П. Изучение современного состояния и динамики изменения ледовой топографии островов Российского Заполярья	6	64
Матвеев Е.В., Карачевцева И.П., Гаров А.С., Патратий В.Д., Коханов А.А., Козлова Н.А., Лубнин Д.С. Разработка модели данных для оптимизации доступа к результатам дистанционного зондирования небесных тел Солнечной системы на примере Луны	6	72
Миртова И.А., Еришов Д.В., Гудкова Д.А. Анализ динамики лесов Московской области по космическим снимкам для целей геоэкологического мониторинга	1	78
Миртова И.А., Прусакова Ю.А. Анализ последствий природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на территории Оренбургской области по материалам дистанционного зондирования	4	75
Миртова И.А., Углик О.А. Анализ динамики ледниковой деятельности для целей предупреждения чрезвычайных ситуаций по материалам дистанционного зондирования Земли	3	47
Миртова И.А., Фатехов Т.М. Анализ динамики наводнений по материалам дистанционного зондирования Земли	6	86
Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Исследование течений на шельфе Черного моря с помощью ГНСС-мониторинга	3	62
Никольский Е.К., Тарарин А.М. Геоинформационный анализ опасности затопления приустьевых территорий с применением разновременных космических снимков	6	92
Старостина О.В., Хмырова Е.Н., Долгоносков Н.В. Применение и сравнительный анализ методов детектирования мелкомасштабных объектов по гиперспектральным спутниковым данным	3	80
Чабан Л.Н., Берёзина К.В. Метод коррекции пространственного сдвига спектральной калибровки на гиперспектральных изображениях в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах	6	96
Чабан Л.Н., Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Методы отбора информативных каналов при тематической обработке гиперспектральных изображений	4	63
Черепанова Е.В., Карачевцева И.П., Гречищев А.В. Геоинформационное картографирование потенциально опасных источников антропогенного загрязнения по данным тепловой инфракрасной съемки LANDSAT ETM+	3	70
Чинь Ле Хунг, Мельникова Е.Б. Разработка методики оценки деградации почв по данным многозональной съемки Landsat и ГИС	3	77

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Бадышева Е.К. Повышение безопасности при передаче ГИС-данных в компьютерных и мобильных сетях	2	111
Бешенцев А.Н., Лубсанов А.А. Создание Интернет-ресурсов на основе ретроспективных топографических карт для мониторинга геосистем бассейна озера Байкал	2	105
Бычков В.О. К вопросу о структуре базы данных инженерно-геодезических изысканий	4	88
Вербицкий Б.Б., Вербицкая Е.А., Журкин И.Г. Особенности применения нейронных сетей в задачах автоматизированного дешифрирования аэрокосмических изображений при обновлении электронных карт	1	103
Вовк И.Г., Бугакова Т.Ю. Решение задачи выбора оптимального варианта изменения пространственно-временного состояния систем для оценки техногенного риска	6	121
Грузинов В.С. Геопорталы и геосети как элементы инфраструктуры обмена геопространственными данными	1	95

Журкин И.Г., Бадышев Т.Т. Анализ изменений железнодорожной сети по космическим снимкам .	3	83
Журкин И.Г., Бадышев Т.Т., Бадышева Е.К. Шифрование геоизображений средствами программного продукта MATLAB	1	108
Карпик А.П., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Косарев Н.С. Методологические принципы системы точной спутниковой навигации подвижных объектов с использованием наземной инфраструктуры ГЛОНАСС.....	5	69
Касьянова Е.Л., Воронкин Е.Ю. Создание интерактивных картографических веб-сервисов	3	87
Касьянова Е.Л., Воронкин Е.Ю. Использование «облачных технологий» для геоинформационного картографирования	4	91
Косиков А.Г. Идеальные модели реальности для географических исследований	5	81
Кохан С.С., Москаленко А.А. Геоинформационное обеспечение оценки состояния земельных ресурсов	2	119
Лонский И.И. Оценка качества картографических произведений	6	118
Лубнин Д.С., Быстров А.Ю., Назаров А.А., Берёзина К.В., Андреев М.А., Гвоздев О.Г., Стоволосов Е.В., Гречищев А.В. О методе интеграции данных дистанционного зондирования с целью извлечения комплексной геопространственной информации	6	110
Майоров А.А., Гвоздев О.Г. Сравнительный анализ потенциала к повторному использованию существующих решений в области обработки пространственных данных	4	81
Майоров А.А., Гвоздев О.Г. Сравнительный анализ технологий локальной оптимизации программ на языке Python в задачах обработки пространственных данных	5	61
Назаров А.А. Расчет приоритетов ремонтно-восстановительных работ для участков дорожных сетей на основе результатов геоинформационного анализа функциональных значений дорог	5	74
Новоселов Д.Б., Новоселова В.А. Создание и внедрение туристских информационных систем на базе трехмерных виртуальных моделей местности	2	115
Остроухов А.В. Геоинформационное моделирование параметров проектируемых водохранилищ для программы строительства ГЭС на Дальнем Востоке	6	104
Сомов С.В., Бычков В.О. Обзор стандартов OpenGIS. OGC - 06-104r4	1	100
Ярмоленко А.С., Куцаева О.А. Разработка и исследование нейроаналитического алгоритма распознавания образов и его устойчивость при наличии шумов	1	111

КАДАСТР, ЭКОНОМИКА И РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ

Антипов И.Т., Жарников В.Б., Кудюшева Р.В. О системе показателей рационального использования земель сельскохозяйственного назначения	4/С	175
Антонович К.М., Дубровский А.В., Никитин В.Н., Подрядчикова Е.Д. Разработка подхода к зонированию городской территории на основе показателя социальной комфортности населения	4/С	134
Антонович К.М., Каленицкий А.И., Аврунев Е.И., Ключниченко В.Н. Современные проблемы подготовки информации для ведения государственного кадастра недвижимости	4/С	122
Архангельская Л.Ю. Проблемы ценообразования в лизинговых сделках по геодезическому оборудованию	5	98
Байков К.С., Ветошкин Д.Н., Митрофанова Н.О. Модель информационного обеспечения комплексных кадастровых работ	4/С	161
Баширов В.Р., Мельникова Е.Б. Городские агломерации. Картографический метод выявления критериев агломераций России	4	95
Бочарова А.А. Теоретические и технологические положения оценки рационального использования лесных участков в составе земель лесного фонда	4/С	213
Ван А.В., Жарников В.Б., Сафонов В.В. Об оценке экологических факторов в системе мониторинга городских земель	4/С	129
Ван А.В., Жарников В.Б., Евсюкова И.Н., Кудюшева Р.В., Сафонов В.В. Институциональная среда современной профессиональной деятельности в области землеустройства и кадастра как фактор оценки ее нормативно-правового обеспечения	4/С	131
Ветошкин Д.Н., Карпик К.А., Архипенко О.П. Алгоритм устранения кадастровых ошибок при описании границ муниципальных образований	4/С	157

Добровольская Н.И., Дубровский А.В., Капустянчик С.Ю., Малыгина О.И., Троценко Е.С. Элементы структуры геоинформационного обеспечения агроэкологического адаптивно-ландшафтного землепользования	4/C	146
Дубровский А.В., Ермолаева Е.А., Подрядчикова Е.Д. Опыт выполнения геоинформационного анализа распределения величины арендной платы коммерческой недвижимости на территории города Новосибирска	4/C	143
Дубровский А.В., Подрядчикова Е.Д. К вопросу совершенствования системы оценки недвижимого имущества на основе расчета показателя социальной комфортности	4/C	153
Жарников В.Б., Ивчатова Н.С. Основные проблемы и положения создания единой учетно-регистрационной системы в Российской Федерации	4/C	170
Илюшина Т.В. Специальные съемки и исследование рек как путей сообщений в России (XIX – начало XX вв.)	1	118
Каленицкий А.И., Аврунев Е.И., Гиниятов И.А., Терентьев Д.Ю. О выборе методов и средств измерений при выполнении кадастровых работ в отношении земельных участков	4/C	139
Карпик К.А. Методика землеустроительных работ по подготовке описания местоположения границ муниципальных образований	4/C	195
Карпик А.П., Аврунев Е.И., Варламов А.А. Совершенствование методики контроля качества спутникового позиционирования при создании геоинформационного пространства территориального образования	4/C	182
Карпик А.П., Ветошкин Д.Н. Современная модель согласования и разрешения споров о местоположении границ муниципальных образований	4/C	115
Колмогоров В.Г., Аврунев Е.И., Метелева М.В., Радченко А.В. Предложения по совершенствованию структуры геопрограммного обеспечения территории населенных пунктов	4/C	186
Колмогоров В.Г., Новоселов Ю.А., Аврунев Е.И., Труханов А.Э. Инвентаризация сведений государственного кадастра недвижимости о местоположении границ земельных участков и объектов капитального строительства	4/C	178
Конотопов А.И. Место пространственных инноваций в развитии территорий	5	91
Кудинова А.В. Методика комплексной оценки территорий кадастровых кварталов мегаполиса на основе факторного анализа данных	6	126
Лебедев Ю.В., Гагарин А.И. Стоимость природных благ в системах национальных счетов	4/C	220
Липски С.А. Межевание земель в России: многовековая история и современность	3	93
Лысых Д.В. О статусе и кадастровой оценке помещений в блокированных домах	4/C	207
Максудова Л.Г., Маставичене Т.В. Возможности современных баз данных для снижения стоимости проведения массовой кадастровой оценки	5	88
Москвин В.Н., Байков К.С., Новоселов Ю.А., Соколова Т.А. Оценка кадастровой и рыночной стоимости объектов недвижимости экспертными методами	4/C	189
Москвин В.Н., Гиниятов И.А., Ильиных А.Л. К вопросу совершенствования осуществления муниципального земельного контроля	4/C	126
Рязанцева М.В., Якушова Е.С. Стимулирование притока иностранных инвестиций в развитие территорий РФ	3	98
Рязанцева М.В., Закиров А.С. Проблемы приватизации объектов нежилого фонда субъектами малого предпринимательства	4	100
Руденских Е.Б. Учёт экологических характеристик при территориальном планировании на примере муниципальных образований Кочковского района Новосибирской области	4	103
Рязанцева М.В. Оценка эффективности деятельности особых экономических зон	5	93
Татаренко В.И., Попп Е.А. О необходимости учета влияния экологической составляющей на кадастровую стоимость объектов недвижимости на территории населенных пунктов	4/C	165
Трубина Л.К., Лебедев Ю.В., Лебедева Т.А. Кадастровая стоимость лесных земель как часть природного потенциала территории	4/C	225
Трубина Л.К., Лебедев Ю.В., Неклюдов И.А., Лебедев К.Ю. Кадастровая оценка зелёных зон городов на Урале	4/C	112
Трубина Л.К., Панов Д.В. Совершенствование мониторинга городских земель на основе учета особенностей рельефа	4/C	217

Уставич Г.А., Зятькова Л.К., Пошивайло Я.Г., Яковенко Ю.Ю. Применение геоинформационных технологий при составлении карт-схем для мониторинга и оценки радиационной обстановки на Семипалатинском испытательном ядерном полигоне	4/С	200
---	-----	-----

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Жбанова В.Л. Цифровая фотокамера для компактного фотоэлектрического колориметра	3	116
Малькин А.А. Алгоритмы расчёта оптических систем с использованием ограниченного перечня марок стёкол	4	113
Парвулюсов Ю.Б., Жбанова В.Л. Моделирование хода лучей в матричном фотоприемнике с многослойной структурой	4	108
Парвулюсов Ю.Б., Мартыненко Г.В., Жбанова В.Л. Системы цветоделения на основе светофильтров со спектральными характеристиками XYZ	1	133
Попов Н.Н., Проходцева Л.В., Андреев А.Н., Матвеев Д.С., Шкаманова М.В., Афанасов Д.С. Методы исследования наноструктуры материалов оптотехники	5	116
Попов Н.Н., Проходцева Л.В., Матвеев Д.С., Родимкина Е.Ю., Афанасов Д.С. Систематизация классов материалов оптотехники	5	104
Попов Н.Н., Филонов А.С., Донцов Г.А., Матвеев Д.С. Перспективные углеродные наноматериалы оптических модулей космических аппаратов	1	127
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	2	127
Савиных В.П., Попов Н.Н., Филонов А.С., Донцов Г.А. История создания оптических модулей и малых космических аппаратов	3	103
Сагалаев Д.А. Методика измерения показателя преломления неоднородных оптических материалов по нарушению полного внутреннего отражения неомоцентрических пучков	3	120
Сагалаев Д.А. Расчет констант дисперсионных формул для описания спектрального распределения показателя преломления градиентного материала	4	120
Соломатин В.А., Мартынов Д.В. Методика расчета фасеточных панорамных оптико-электронных систем с фокальными матрицами	5	112
Эль-Шейх Хани, Якушенков Ю.Г. Пространственное разрешение бортовых оптико-электронных систем дистанционного зондирования	3	111

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Рязанцева И.В. Образовательные кластеры в системе воспроизводства конкурентоспособных специалистов	2	134
Якушенков Ю.Г. Содержание и формы научно-исследовательской работы магистрантов, обучающихся по направлениям технических наук	1	138

ХРОНИКА

Мисюров Д.А. МИИГАиК определил координаты географического центра Москвы: диалектика мировоззренческих перемен	5	129
Памяти Владимира Борисовича Дубиновского	1	141
Юшкина Н.В. Общество и природа: от потребительства к гармонии	3	125
Ярмоленко А.С. Слово об ученом	5	125
К 100-летию со дня рождения Михаила Дмитриевича Мальцева	6	129
К 100-летию со дня рождения Якова Моисеевича Ивандикова	6	133
К 120-летию со дня рождения Федора Васильевича Дробышева	6	134

Содержание

АСТРОНОМИЯ, ГРАВИМЕТРИЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Кащеев Р.А., Новлянская И.О. Сравнение и оценка точности современных моделей гравитационных потенциалов Луны и Марса	3
Дроздов Н.Д. Спутниковое позиционирование, гравистика и глобальная геодезия.....	9

ГЕОДЕЗИЯ

Савиных В.П., Ямбаев Х.К. Геодезия – древнейшая фундаментальная и прикладная наука об исследовании Земли и её физических полей.....	16
Шеховцов Г.А., Шеховцова Р.П. Новые способы формирования и использования вертикальных референтных прямых.....	22
Кроличенко О.В. Методика наблюдений за деформациями инженерных сооружений специального назначения.....	27
Маркузе Ю.И., Ямбаев Х.К. Структурная схема мониторинга и алгоритм анализа деформаций земной коры по результатам спутниковых измерений на пунктах региональных референционных сетей.....	30

КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА, АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЯ

Зубарев А.Э., Надеждина И.Е., Патратий В.Д., Митрохина Л.А., Коханов А.А., Карачевцева И.П., Оберст Ю. Создание базы геоданных изображений для оценки изученности поверхности спутника Юпитера Ганимед по данным миссий Галилео и Вояджер-1,-2	37
Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И. Дешифрирование стереоскопической модели местности	42

КАРТОГРАФИЯ

Креславский М.А., Коханов А.А., Карачевцева И.П. Картографирование топографической шероховатости северного полушария Меркурия по данным лазерной альтиметрии миссии Мессенджер	48
Верхотуров А.А. Математическая основа карт комплексного геоэкологического атласа Сахалинской области	54
Алексеев Н.А., Медведев А.А., Михайлова Т.В. Изучение геохимического влияния Губкинского-Старооскольского промышленного комплекса на заповедные экосистемы «Ямской степи»	58

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

Малинников В.А., Никольский Д.Б., Савиных В.П. Изучение современного состояния и динамики изменения ледовой топографии островов Российского Заполярья.....	64
Матвеев Е.В., Карачевцева И.П., Гаров А.С., Патратий В.Д., Коханов А.А., Козлова Н.А., Лубнин Д.С. Разработка модели данных для оптимизации доступа к результатам дистанционного зондирования небесных тел Солнечной системы на примере Луны.....	72
Веровочкин Ю.Г., Ильин Ю.А., Малинников В.А., Престон Н.Е. Моделирование тепловых ИК-изображений земных ландшафтов.....	82
Миртова И.А., Фатехов Т.М. Анализ динамики наводнений по материалам дистанционного зондирования Земли.....	86
Никольский Е.К., Тарарин А.М. Геоинформационный анализ опасности затопления прирусловых территорий с применением разновременных космических снимков.....	92
Чабан Л.Н., Берёзина К.В. Метод коррекции пространственного сдвига спектральной калибровки на гиперспектральных изображениях в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах	96

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Остроухов А.В. Геоинформационное моделирование параметров проектируемых водохранилищ для программы строительства ГЭС на Дальнем Востоке	104
Лубнин Д.С., Быстров А.Ю., Назаров А.А., Берёзина К.В., Андреев М.А., Гвоздев О.Г., Стоволосов Е.В., Гречищев А.В. О методе интеграции данных дистанционного зондирования с целью извлечения комплексной геопрограммной информации.....	110
Лонский И.И. Оценка качества картографических произведений	118
Вовк И.Г., Бугакова Т.Ю. Решение задачи выбора оптимального варианта изменения пространственно-временного состояния систем для оценки техногенного риска.....	121

КАДАСТР, ЭКОНОМИКА И РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ

Кудинова А.В. Методика комплексной оценки территорий кадастровых кварталов мегаполиса на основе факторного анализа данных	126
---	-----

ХРОНИКА

К 100-летию со дня рождения Михаила Дмитриевича Мальцева	129
К 100-летию со дня рождения Якова Моисеевича Ивандикова.....	133
К 120-летию со дня рождения Федора Васильевича Дробышева	134
Алфавитно-тематический указатель	135

Content

ASTRONOMY, GRAVIMETRY, AND SPACE GEODESY

<i>Kashcheev R., Novlyanskaya I.</i> Comparing modern models of Mars and Moon gravity potentials and evaluating their accuracy	3
<i>Drozdov N.</i> Satellite positioning, gravistics and global geodesy	9

GEODESY

<i>Savinykh V., Yambaev Kh.</i> Geodesy — the oldest fundamental and applied science about the Earth and its physical fields	16
<i>Shekhovtsov G., Shekhovtsova R.</i> New methods of forming and using vertical reference lines	22
<i>Krolichenko O.</i> Methods of observing deformations of engineering structures of special purpose	27
<i>Markuze Yu., Yambaev Kh.</i> Structural chart of monitoring and an algorithm for analysis of earth crust deformations, based on satellite measurements in the regional reference network points	18

SPACE SURVEY, AEROPHOTOGRAPHY, AND PHOTOGRAMMETRY

<i>Zubarev A., Nadezhkina I., Patratiy V., Mitrokhina L., Kokhanov A., Karachevtseva I., Oberst J.</i> Creating geodatabase of images for evaluation of level of surface scrutiny of Jupiter's moon Ganymede based on data from Galileo, Voyager-1 and -2 missions	37
<i>Knizhnikov Yu., Kravtsova V.</i> Interpretation of stereoscopic model of an area	30

CARTOGRAPHY

<i>Kreslavsky M., Kokhanov A., Karachevtseva I.</i> Mapping topography of rough areas of the northern hemisphere of Mercury after the Messenger laser altimetry	48
<i>Verkhoturov A.</i> Mathematical footing of maps for complex geoecological atlas of Sakhalin region	54
<i>Alexeenko N., Medvedev A., Mikhailova T.</i> The study of the Gubkinskiy Starooskolski-industrial complex geochemical influence on the protected ecosystem of "Yamskaya steppe"	58

REMOTE SENSING, AND LAND MONITORING

<i>Malinnikov V., Nikolskiy D., Savinykh V.</i> Studying modern state and dynamics of changes in ice topography of islands of the Russian polar region	64
<i>Matveev E., Karachevtseva I., Garov A., Patratiy V., Kokhanov A., Kozlova N., Lubnin D.</i> Developing data model for optimization of access to remote sensing results on celestial bodies on example of the Moon	72
<i>Verevchkin Yu., Iliin Yu., Malinnikov V., Preston N.</i> Modelling thermal IR-images of terrestrial landscapes	82
<i>Mirtova I., Fatekhov T.</i> Analysing dynamics of floods based on the Earth remote sensing materials	86
<i>Nikolskiy E., Tararin A.</i> Geoinformational analysis of flood risk in riverine territories with the use of noncontemporaneous space images	92
<i>Chaban L., Beriozina K.</i> Technique of correcting a spectral calibration spatial shift in hyperspectral image in visible and close infrared range	96

GEOINFORMATION TECHNOLOGY

<i>Ostroukhov A.</i> Geoinformational modelling of parameters of contemplated reservoirs for HPP building programme in the Far East	104
<i>Lubnin D., Bystrov A., Nazarov A., Berezina K., Andreev M., Gvozdev O., Stovolosov E., Grechishev A.</i> On the method of integrating remote sensing data for extraction of complex geospatial information	110
<i>Lonsky I.</i> Quality assessment of map products	118
<i>Vovk I., Bugakova T.</i> Solving the problem of choosing an optimal option of changing state of a system in space and time for assessment of industrial jeopardy	121

CADASTRE, LAND ECONOMICS AND DEVELOPMENT

<i>Kudinova A.</i> Method of complex assessment of territories of cadastral quarters in metropolis based on factor analysis ...	126
---	-----

CHRONICLE

To 100th birthday anniversary of professor Mikhail Dmitrievitch Maltsev	129
To 100th birthday anniversary of Yakov Moiseevich Ivandikov	133
To 120th birthday anniversary of Fiodor Vasilievich Drobishev	134
Alphabetical subject index	135