

ISSN 0869-7809

Номер 2

Март–Апрель 2024



ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2024

Неоструктурное районирование Российской части восточного сегмента мегасвода
Большого Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий)
С. А. Несмеянов, М. Ю. Никитин, О. А. Воейкова, М. Н. Комаревская 3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Ресурсный потенциал геосистем Воробьевых гор: история, изучение, перспективы развития
*Т. А. Барабошкина, Е. Н. Самарин, И. В. Аверин, Р. Ю. Жидков, Н. Н. Ракитина,
И. А. Родькина, В. С. Руцкина, Т. Н. Лубкова, О. А. Липатникова* 19

Сейсмичность Марокко и моделирование последствий землетрясения 08.09.2023
с использованием системы “Экстремум”
Н. И. Фролова, И. П. Габсатарова, С. П. Суцев, Н. С. Малаева 33

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Ртуть в окружающей среде урбанизированной территории в криолитозоне
В. Н. Макаров 45

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

Разработка модуля тепломассопереноса к коду Feflow для расчета закачки рассолов
в многолетнемерзлые породы
И. А. Расторгуев, И. В. Литвинова, Н. А. Иост, А. В. Ильин 56

Оценка водного и солевого баланса свалочного тела методом моделирования на примере
полигона ТКО в г. Дубна
И. А. Позднякова 66

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты испытаний усовершенствованного короткобазисного цифрового деформометра с помощью
новой конструкции стенда
А. Б. Манукин, В. В. Тимков, В. В. Савосин, М. А. Гинзбург 76

ЛЮДИ НАУКИ

Евгений Меркурьевич Пашкин (К 90-летию) 82

CONTENTS

No. 2, 2024

- Neostructural zoning of the Russian part of the Greater Caucasus megavault, the eastern segment
(advanced studies for engineering survey)
S. A. Nesmeyanov, M. Yu. Nikitin, O. A. Voeikova., M. N. Komarevskaya 3

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

- Resource potential of Vorob'evy Gory geosystems: history, study, and prospects for development
*T. A. Baraboshkina, E. N. Samarin, I. V. Averin, R. Yu. Zhidkov, N. N. Rakitina, I. A. Rod'kina,
V. S. Rutskina, T. N. Lubkova, O.A. Lipatnikova* 19

- Seismicity of Morocco and modeling of 08.09.2023 earthquake consequences using
the "Extremum" system
N. I. Frolova, I. P. Gabsatarova, S. P. Syshchev, N. S. Malaeva 33

ENVIRONMENT CONTAMINATION

- Mercury in the urban area environment in the cryolithozone
V. N. Makarov 45

MODELS IN ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY

- Development of heat and mass transfer modulus to FEFLOW code for calculation of brine loaded
to permafrost ground
I. A. Rastorguev, I. V. Litvinova, N. A. Iost, A. V. Il'in 56

- Assessment of the water and salt balance in the landfill body by modeling using the example
of the Dubna city landfill
I. A. Pozdnyakova 66

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

- Test results of an improved short-baseline digital deformometer using a new bench design
A. B. Manukin, V. V. Timkov, V. V. Savosin, M. A. Ginzburg 76

PEOPLE OF SCIENCE

- Evgenii Merkur'evich Pashkin (to the 90th anniversary) 82
-
-

УДК 551.248.2 (224.91)

НЕОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА БОЛЬШОГО КАВКАЗА (ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ)

© 2024 г. С. А. Несмеянов¹, М. Ю. Никитин², О. А. Воейкова^{1,*}, М. Н. Комаревская¹

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),

Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Воробьевы горы, 1, Москва, 119899 Россия

*E-mail: voa49@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 22.11.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

Применение оротектонического метода позволило существенно детализировать предлагавшиеся ранее схемы неотектонического районирования Восточного сегмента мегасвода Большого Кавказа. В российской части сегмента прослежены зоны Северо-восточной и Центральных поднятий. В пределах Северо-восточной зоны выделены Западная, Восточная и Южная подзоны, различающиеся по своему строению и ориентировке основных структур. В Западной и Южной подзонах преобладают блоковые структуры, а в Восточной – складчатые. Среди антиклинальных складок встречаются складки с размытыми сводами, а также складки, сохранившиеся частично. Зона Центральных поднятий включает подзоны Бокового и Главного хребтов, разделенные подзоной Осевых прогибов. Подзона прогибов пересекает весь Восточный сегмент мегасвода и включает Северо-западную группу различно ориентированных грабенов и восточную Бежтино-Самурскую шовно-депресссионную зону с продольными грабенами. Данная зона и ее подзоны ограничены наиболее крупными сбросами и взбросами. Большинство региональных и локальных структур разделено активными сбросами, которые могут оказаться опасными при оценке устойчивости инженерных сооружений. Полученные оригинальные данные, отсутствующие в стандартных материалах по геологической съемке на данной территории, полезны для строительного проектирования и геоэкологии.

Ключевые слова: мегасвод, сегмент, зона, подзона, шовная зона, горст, структурная ступень, грабен, антиклиналь, синклиналь, сброс, взброс, флексура

DOI: 10.31857/S0869780924020011; EDN: EAARJB

ВВЕДЕНИЕ

Е.Е. Милановский [3, с. 160] проводил северную границу рассматриваемой части Большого Кавказа по зоне Сулакского глубинного разлома, выраженной на поверхности крупной флексурой. Восточной границей Дагестанской части мегасвода он также считал прямолинейную флексуру юго-восточного простираения. Он выделял здесь зоны Северного крыла и Срединную, а в пределах последней – поднятия Бокового и Главного хребтов, разделенные Бежтино-Самурской депрессией. Все эти основные структуры использовались и при более позднем районировании [7, 9, 11], в том числе детальном [1].

Применение оротектонического метода [6] позволило существенно детализировать предлагавшиеся ранее схемы неотектонического районирования Восточного сегмента мегасвода Большого Кавказа.

1. ОСНОВНЫЕ НЕОСТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОСТОЧНОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА

Восточный (Дагестанский) сегмент мегасвода характеризуется большей, чем у Казбекского сегмента, шириной и постепенным разворотом структур от субширотных на западе до почти субмеридианальных на востоке. Сегмент включает специфически построенные зоны: Северо-восточную и Центральных поднятий (рис. 1, табл. 1, 2).

2. СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ ЗОНА ВОСТОЧНОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА

Внешняя зона облекает Восточный сегмент с севера и востока, поэтому ее целесообразно именовать Северо-восточной зоной.

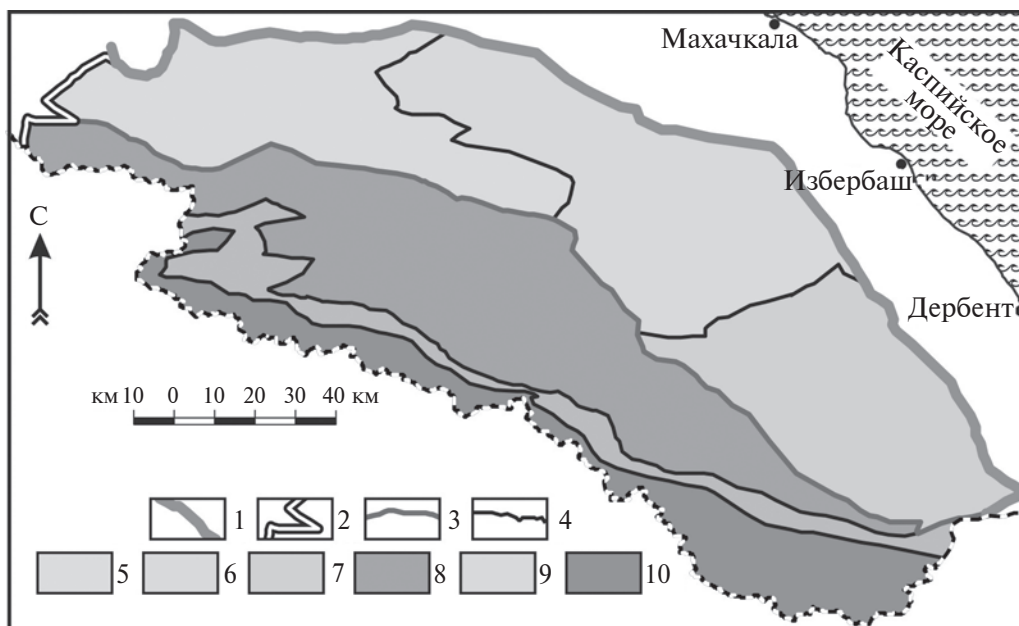


Рис. 1. Схема неструктурного районирования Российской части Восточного сегмента Мегасвода Большого Кавказа. 1–4 – границы: 1 – Мегасвода Большого Кавказа, 2 – сегментов мегасвода, 3 – зон, 4 – подзон Восточного сегмента; 5–10 – структурные элементы мегасвода: 5–7 – подзоны Северо-восточной зоны: 5 – Западная, 6 – Восточная; 7 – Южная; 8–10 – подзоны зоны Центральных поднятий: 8 – Бокового хребта, 9 – Осевых прогибов, 10 – Главного хребта.

Таблица 1. Блоковые структуры

Номер	Название	Тип
ВОСТОЧНЫЙ СЕГМЕНТ		
<i>Северо-восточная зона</i>		
<i>Западная подзона</i>		
1	<i>Нуйкорт-Керкетское северное краевое поднятие</i>	
1а	Харачойская	ступень
1б	Нуйкортская	горст-ступень
1в	Керкетская	высокая ступень
1г	Леникорская	ступень
1д	Кашкерламский	горст
2	<i>Беной-Дайская цепь грабенов</i>	
2а	Бенойский	грабен
2б	Дайский	грабен
3	<i>Андийский поперечный грабен</i>	
4	<i>Дайхохско-Киятлинская гряда поднятий</i>	
4а	Асхойская	горст-ступень
4б	Южнодайламская	ступень
4в	Дайхохская	горст-ступень
4г	Хиндойламский	горст
4д	Чанкойская	высокая ступень
4е	Киятлинская	ступень
5	<i>Амуши-Хунзахская система прогибов</i>	
5а	Алилэнская	ступень
5б	Ботлих-Амушиский	грабен
5в	Кванхидатлийская	ступень
5г	Хунзахская	грабен-ступень

Номер	Название	Тип
6	<i>Аржунинский горст</i>	
7	<i>Южная краевая цепь грабенов</i>	
7а	Итумкалинский	грабен
7б	Суулкортская	ступень
7в	Верхнегадерийская	перемычка
7г	Гигатлинский	грабен
7д	Изанийская	перемычка
7е	Телетлинский	грабен
Восточная подзона		
8	<i>Северная гряда горстов</i>	
8а	Суябимеэрская	горст-ступень
8б	Салатауский	горст
8в	Гимринский	горст
9	<i>Салатауская антиклиналь с размытым сводом</i>	
10	<i>Аргванийская синклираль</i>	
11	<i>Гимринско-Апшинская антиклинальная гряда</i>	
11а	Гимринско-Ирганай-ская	антиклиналь с частично размытым сводом
11б	Кадар-Апшинская	антиклиналь с частично размытым сводом

Продолжение табл. 1

Номер	Название	Тип
12	<i>Бетлинско-Урминская цепь синклиналей</i>	
12а	Северогабуршинская	седловина
12б	Бетлинская	синклиналь
12в	Урминская	синклиналь
13	<i>Балул-Северомугринская антиклинальная гряда</i>	
13а	Балульская	горст-антиклиналь
13б	Куркурахская	перемычка
13в	Северомугринская	антиклиналь с размытым сводом
14	<i>Аймак-Левашинская цепь синклиналей</i>	
14а	Аймакинская	грабен-синклиналь
14б	Орада-Чуглинская	перемычка
14в	Левашинская	синклиналь
14г	Западноварасманская	седловина
15	<i>Аракмеэр-Цагналамузская антиклинальная гряда</i>	
15а	Аракмеэрская	антиклиналь с частично размытым сводом
15б	Хохбортская	перемычка
15в	Цагналамузская	горст-антиклиналь
16	<i>Северокиятлинская синклиналь</i>	
17	<i>Мочохско-Барчуминская цепь грабен-синклиналей</i>	
17а	Мочохская	грабен-синклиналь
17б	Гергебильская	грабен-синклиналь
17в	Барчуминский	грабен
18	<i>Ихгохско-Айлитимахинская горст-антиклинальная гряда</i>	
18а	Ихгохский	горст
18б	Гергебильгэсская	горст-антиклиналь
18в	Амалтенская	размытая седловина
18г	Айлитимахинская	горст-антиклиналь
18д	Кавкамахинская	перемычка
19	<i>Рагданчай-Усишская цепь грабен-синклиналей</i>	
19а	Рагданчайская	синклиналь
19б	Акушинская	грабен-синклиналь
19в	Герхмахинская	грабен-синклиналь
19г	Усишская	синклиналь

Номер	Название	Тип
20	<i>Хиндах-Дейбукская антиклинальная гряда</i>	
20а	Хиндахская	антиклиналь с размытым сводом
20б	Кегерская	седловина
20в	Североуллучарская	горст-антиклиналь с размытым сводом
20г	Бутридагская	седловина
20д	Дейбукская	антиклиналь с размытым сводом
21	<i>Гуниб-Нахорухская цепь прогибов</i>	
21а	Гунибская	грабен-синклиналь
21б	Ругуджинский	грабен
21в	Нахорухская	грабен-ступень
22	<i>Юго-западная краевая группа блоков</i>	
22а	Бухтынская	ступень
22б	Вачинская	ступень
22в	Нижнехунникий	грабен
22г	Шунудагский	горст
22д	Сарибакуская	ступень
23	<i>Восточная краевая группа ступеней</i>	
23а	Шамхалдагская	ступень
23б	Урахинская	ступень
23в	Верхнемудебкиская	ступень
Южная подзона		
24	<i>Северная группа блоков</i>	
24а	Кулийская	ступень
24б	Убардабанская	ступень
24в	Кубачинская	грабен-ступень
25	<i>Восточная краевая группа блоков</i>	
25а	Уркарахская	ступень
25б	Карасыртский	горст
25в	Кабирская	грабен-ступень
26	<i>Центральная группа блоков</i>	
26а	Джабудагская	горст-ступень
26б	Джудудагский	горст
26в	Шарайская	ступень
26г	Буркиханская	грабен-ступень
26д	Тпигская	грабен-ступень
26е	Чимидагская	седловина
26ж	Колохдагский	горст
27	<i>Западная краевая группа блоков</i>	
27а	Ричайская	ступень
27б	Верхнекурахский	грабен
27в	Рунердагская	ступень

Продолжение табл. 1

Номер	Название	Тип
Зона центральных поднятий		
Подзона Бокового хребта		
28	<i>Кобуламское поднятие</i>	
28a	Кобуламский	горст
28б	Саситлийская	горст-ступень
28в	Хваршинская	горст-ступень
28г	Тебулинская	ступень
29	<i>Северо-восточная краевая группа ступней</i>	
29a	Тиндинская	ступень
29б	Хебдинская	ступень
29в	Цурибская	ступень
29г	Хулисмаская	ступень
29д	Ругольдинская	высокая ступень
30	<i>Центральное поднятие Бокового хребта</i>	
30a	Кадская	горст-ступень
30б	Богосская	горст-ступень
30в	Анцухская	высокая ступень
30г	Гечбичский	горст
31	<i>Юго-восточная группа горстов</i>	
31a	Самурский	горст
31б	Лаказаниская	седловина
31в	Карасамурский	грабен
31г	Хултайдагский	горст

Номер	Название	Тип
Подзона Осевых прогибов		
32	<i>Северо-западная группа грабенов</i>	
32a	Верхнеандийский	грабен
32б	Метлютская	седловина
32в	Кидеройский	грабен
33	<i>Бежтино-Самурская шовно-депресссионная зона</i>	
33a	Верхнезанорская	перемычка
33б	Бежтинский	грабен
33в	Самурский	грабен
Подзона Главного хребта		
34	<i>Осовая гряда горстов</i>	
34a	Кириотинская	горст-ступень
34б	Шавиклдинский	горст
34в	Богосский	горст
34г	Ношимарская	горст-ступень
34д	Гутонский	горст
34е	Ахвайская	горст-ступень
34ж	Базыкинский	горст
34з	Цайлаханская	горст-ступень
34и	Базардюзинский	горст
35	<i>Верхнеахтычайский грабен</i>	
36	<i>Шалбуздаг-Шахдагской гряды горстов</i>	
36a	Шалбуздагский	горст
36б	Микрахская	седловина
36в	Шахдагский	горст

Таблица 2. Разрывные структуры

Номер	Название	Тип
ВОСТОЧНЫЙ СЕГМЕНТ		
Северо-восточная зона		
Западная подзона		
1	Дартендук-Салатауский	сброс
2	Тюреламский	сброс
2a	Петхойламская	флексура
3	Западнобандукский	сброс
3a	Шатойская	флексура
4	Бенойский	сброс
5	Шариламская	флексура
6	Южнобахеламский	сброс
7	Кашкерламский	сброс
8	Сэдубильская	флексура
9	Ишхойламский	сброс
10	Буцрахский	сброс
11	Зилойская	флексура
12	Дайский	сброс

Номер	Название	Тип
19/13	Хочкочский	сброс
13a	Тунжаульская	флексура
14	Североболгинский	сброс
15	Верхнеинзахкский	сброс
16	Хиндойламский	сброс
17	Ансалтинский	сброс
18	Киятлинский	сброс
19	Северомунийский	сброс
20	Шодродайский	сброс
21	Североаржутинский	сброс
22	Амиштайская	флексура
23	Южноихгохский	сброс
24	Западномиарсойская	флексура
25	Ботлихская	флексура
26	Годоберийская	флексура
27/22	Верхнебарский	сброс
28	Асхой-Зоногохский	сброс

Продолжение табл. 2

Номер	Название	Тип
29	Маалийская	флексура
30	Южношаройская	флексура
31/39	Вегилам-Снеговой	сброс
32	Батлахатлийская	флексура
33	Гигатлингэсский	сброс
33a	Изанийская	флексура
33б	Болнухский	сброс
Восточная подзона		
34	Северогимринский	сброс
35	Востоchnосалатауская	флексура
36	Салатау-Гимринский	сброс
37	Роцотльский	сброс
38	Ихгох-Ганцейшалесский	сброс
39	Западнокудутльская	флексура
40	Балупский	сброс
41	Мугинский	сброс
42	Варасманский	сброс
43	Кицтюбураский	сброс
43a	Дегвайская	флексура
44	Аталгинский	сброс
45	Дубримахинский	сброс
46	Западночохский	сброс
47	Ругуджинская	флексура
48	Северошангодский	сброс
48a	Унчукатльская	флексура
49	Кумухская	флексура
50	Уллучараский	сброс
51	Инзимахинская	флексура
52	Восточновихлиский	сброс
53	Шовкраский	сброс
54	Мурсруйский	сброс
55	Харбукский	сброс
56	Сумбатльская	флексура
57	Бацадинская	флексура
Южная подзона		
58	Востоchnокубачинский	сброс
59	Чинганский	сброс
60	Кокмадагский	сброс
61	Аккусандейский	сброс
62	Худигский	сброс
63	Уллучай-Курахский	сброс
64	Карасыртский	сброс
65	Шараозерская	флексура
66	Северогумцидагская	флексура
67	Северотпигская	флексура
68	Хургабек-Питадагский	сброс
69	Карахский	сброс
70	Кологдагский	сброс

Номер	Название	Тип
71	Бедюкская	флексура
72	Тукуидалыкский	сброс
73	Кутулский	сброс
74	Нижнесамурский	сброс
75	Восточный краевой	сброс
75a	Исликская	флексура
Зона центральных поднятий		
Подзона Бокового хребта		
76	Тушетско-Акарабакский	сброс
76a/41	Ацунта-Маистийский	сброс
77	Снеговой	сброс
78	Купигунийский	сброс
79	Хушетский	сброс
80	Устьхваршинский	сброс
81	Тиндинская	флексура
82	Гамчильский	сброс
83	Ценебский	сброс
84	Канарский	сброс
85	Бежира-Чультынский	сброс
86	Гарийский	сброс
87	Востоchnобогосский	сброс
88	Нукулорский	сброс
89	Верхнесамурский	сброс
90	Балиалский	сброс
91	Катрухский	сброс
92	Ихрекский	сброс
Подзона осевых прогибов		
93	Кабданский	сброс
94	Кусанский	сброс
95	Хейрахский	сброс
96	Западнобогосский	сброс
97	Востоchnогенухский	сброс
98	Тляратинский	взброс
99	Востоchnотляратинский	взброс
100	Южнобежтинский	сброс
101	Кусур-Мискинджийский	сброс
Подзона Главного хребта		
102	Какитльский	сброс
103	Созольский	сброс
104	Хечек-Верхнемулларчайский	сброс
105	Чарисина-Шахдагский	сброс
106	Микрахский	сброс
107	Каладжухский	сброс
108	Джюмайский	сброс
109	Даличайская	флексура
110	Западноалкамудский	сброс

Северо-восточная зона (или зона Северного и Восточного крыльев) делится на подзоны: Западную, Восточную и Южную. Западная и Южная подзоны объединяют преимущественно блоковые структуры, а расположенная между ними Восточная подзона – в основном складчатые.

2.1. Западная подзона

Западная подзона включает преимущественно субширотные структуры (см. табл. 1, рис. 2): Нуйкорт-Керкетское северное краевое поднятие (1), Беней-Дайскую цепь грабенов (2), Андийский поперечный грабен (3), Дайхохско-Килятлинскую гряду поднятий (4), Амуши-Хунзахскую систему прогибов (5), Аржутинский горст (6), Южную краевую цепь грабенов (7).

Западный край подзоны выступает к северу от северного края востока Казбекского сегмента, ограниченного с севера Хочкочским сбросом (19/13). Этот край и граница мегасвода проходят по меридианальной Шатойской флекуре (3а) и Западнобандукскому сбросу (3), связанному с долиной Аргуна. К ним с востока подходят структуры *Нуйкорт-Керкетского северного краевого поднятия* (1) и Беней-Дайской цепи грабенов (2). Указанное краевое поднятие представлено здесь Нуйкортской горст-ступенью (16), к которой подходят с северо-востока краевая Харачойская ступень (1а), а с востока – обширная Керкетская

высокая ступень (1в). Последняя на востоке доходит до Ишхойламского сброса (9) на границе с Восточной подзоной, а на юге сочленяется по Южнобахеламскому сбросу (6) с клиновидной Леникорской ступенью (1г) и по Дайскому сбросу (12) – с узким широтным Кашкерламским горстом (1д). Еще восточнее, с юга к Керкетской высокой ступени (1в) причленяется по Сэдубильской флекуре (8) северный торец субмеридианального Андийского поперечного грабена (3), который на востоке по Буцрахскому сбросу (10) граничит со структурами Восточной подзоны.

Северной границей Нуйкорт-Керкетского северного краевого поднятия (1) и мегасвода служит западная часть Дартендук-Салатайского сброса (1).

Беней-Дайская цепь грабенов (2) включает западный Бенейский (2а) и восточный Дайский (2б) широтные грабены, разделенные южной частью Шариламской меридианальной флексуры (5). Дайский грабен ограничен с севера Дайским сбросом (12), а с юга – восточной частью Хочкочского сброса (19/13) и Тунжааульской изгибающейся флексурой (13а).

Расположенные южнее Дайхохско-Килятинская гряда поднятий (4) и более южная Южная краевая цепь грабенов (7) значительно выступают к западу, где по субмеридианальному Верхнебарскому сбросу (27/22) граничат со структурами Казбекского сегмента.

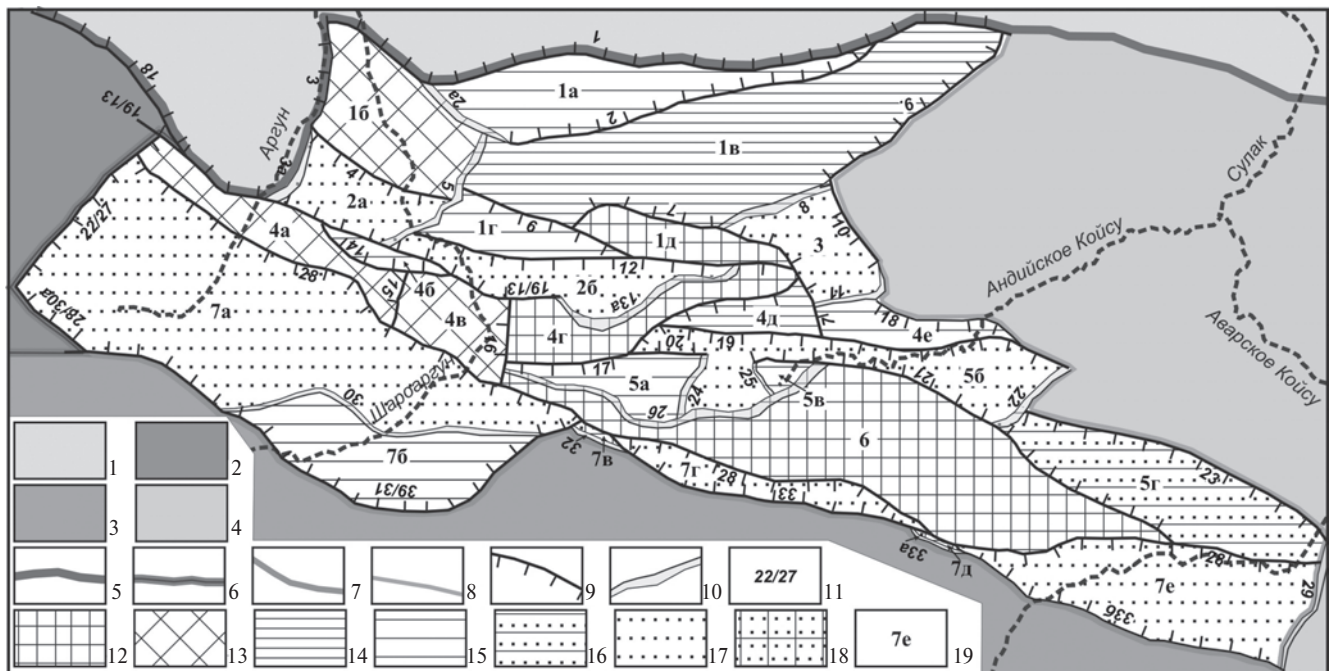


Рис. 2. Схема неоструктурного районирования Западной подзоны Северо-восточной зоны Восточного сегмента. 1 – Терско-Каспийский краевой прогиб; 2 – Казбекский сегмент; 3 – Зона центральных поднятий; 4 – Восточная подзона Северо-восточной зоны; 5–8 – границы: 5 – Мегасвода Большого Кавказа, 6 – сегментов мегасвода, 7 – зон, 8 – подзон; 9 – сбросы; 10 – флексуры; 11 – номера разрывов и флексур (см. табл. 2); 12–18 – типы блоковых структур Западной подзоны: 12 – горсты, 13 – горст-ступени, 14 – высокие ступени, 15 – ступени, 16 – грабен-ступени, 17 – грабены, 18 – перемычки; 19 – номера блоковых структур (см. табл. 1).

Узкая широтная *Дайхохско-Киятлинская гряда поднятий* (4) включает Асхойскую горст-ступень (4а), Южнодайламскую ступень (4б), Дайхохскую горст-ступень (4в), Хиндойламский горст (4г), подходящую к нему с юга клиновидную Чанкойскую высокую ступень (4д) и более восточную Киятлинскую ступень (4е), которая по Киятлинскому сбросу (18) облекает с юга западный выступ Восточной подзоны.

Широкая *Южная краевая цепь грабенов* (7) по изгибающейся системе сбросов, включающей Вегилам-Снеговой (31/39), Гигатлингэский (33) и Болнухский (33б) сбросы, граничит с Зоной Центральных поднятий. Эта цепь грабенов представлена на западе широким Итумкалинским грабеном (7а), к юго-востоку от которого, отделяясь Южношаройской флексурой (30), подходит линзовидная Сукулкортская ступень (7б). Восточнее к этой цепи после маленькой Верхнегадерийской перемычки (7в) относится узкий Гигатлинский грабен (7г), который, в свою очередь, отделяется Изанйской перемычкой (7д) от расширяющегося к востоку Телетлинского грабена (7е). Последний вместе с Хунзахской горст-ступенью (5г) по меридианальной Маалийской флексуре (29) торцово приключается к границе с Восточной подзоной.

К востоку от центра Западной подзоны, между рассмотренными выше Дайхох-Киятлинской грядой поднятий (4) и Южной краевой цепью грабенов (7) простираются *Амуши-Хунзахская система прогибов* (5) и более южный, линзовидно расширяющийся посередине *Аржунинский горст* (6). Система прогибов включает западную Алинскую ступень (5а), сложный (с Ботлихским и Амушинским расширениями) Ботлих-Амушинский грабен (5б), небольшую, треугольной формы, Кванхидатлийскую ступень (5в) и протяженную Хунзахскую грабен-ступень (5г), которая по Южноихгохскому сбросу (23) граничит с югом западного выступа Восточной подзоны.

2.2. Восточная подзона

Восточная подзона, как сказано выше, характеризуется широким развитием брахиморфных складчатых структур. Эти структуры неоднократно описывались [2, 8 и др.], а трассировка их осей используется до последнего времени [9]. Традиционно считается, что в поперечном сечении антиклиналям свойственна коробчатая (сундучная) форма, а синклинали могут быть как

коробчатыми (корытообразными), так и острыми килевидными. Широкие, плоские своды антиклиналей нередко осложняются куполовидными вздутиями (рис. 3).

По Е.Е. Милановскому [3, с. 179]: “*время наиболее интенсивного складкообразования падает на начало неотектонической стадии, т.е. на конец миоцена—средний плиоцен, поскольку палеогеновые и даже миоценовые отложения, до нижнего сармата включительно в пределах синклиналей дислоцированы конформно с меловыми и наклонены на их крыльях местами до 80–85° (Акушинская синклиналь)*”.

Характерной чертой ряда крупных антиклиналей является размытость их сводов с образованием на месте сводов плоскодонных орографических впадин, окруженных обрывами или гребнями. Такие складки ниже будут именоваться “антиклиналь с размытым сводом” (рис. 4)¹.

Следует отметить, что подобные преобразования характерны для складок, в строении которых относительно пластичные отложения перекрываются более прочными, например, во впадинах Средней Азии, где на песчано-глинистые породы налегают сцементированные конгломераты. Там антиклинальные увалы первой стадии после разрушения свода сменяются кольцевой грядой (рис. 5) [5]. Во всех случаях разрушение сводов происходит за счет расширения и частого слияния речных долин, пересекающих эти антиклинали. Такому расширению способствует снижение прочности сводов за счет повышения их трещиноватости. Соответственно, следует выделять две стадии орографического преобразования антиклинальных складок, когда антиклиналь-увал сменяется антиклиналью с размытым сводом.

Характерно присутствие отдельных, не полных антиклиналей с размытым сводом, т.е. “полуантиклиналей”, срезанных поперечными сбросами (рис. 6).

Восточная подзона объединяет различно ориентированные, преимущественно складчатые структуры: Северную гряду горстов (8), Салаускую² антиклиналь с размытым сводом (9), Аргванийскую синклиналь (10), Гимринско-Апшинскую антиклинальную гряду (11), Бетлинско-Урминскую цепь синклиналей (12), Балул-Северомугринскую антиклинальную гряду (13), Аймак-Левашинскую цепь синклиналей (14), Аракмеэр-Цагналамузскую антиклинальную гряду (15), Северокиятлинскую синклиналь (16), Мочохско-Барчуминскую цепь грабен-синклиналей (17), Ихгохско-Айлитимахинскую горст-антиклинальную гряду (18), Рагданчай-Усишскую цепь грабен-синклиналей (19), Хиндах-Дейбускую гряду горст-антиклиналей с размытыми сводами (20), Гуниб-Нахорухскую цепь прогибов (21), Юго-западную краевую группу блоков (22), Восточную краевую группу ступеней (23).

¹ Плоскодонные впадины в сводах антиклиналей, по аналогии с альпийскими, Н.С. Шатский [10] именовал “ключами”.

² В книге “Тектоническая карта Дагестана масштаба 1:500 000 (объяснительная записка)” [9] эта антиклиналь названа Салаусской

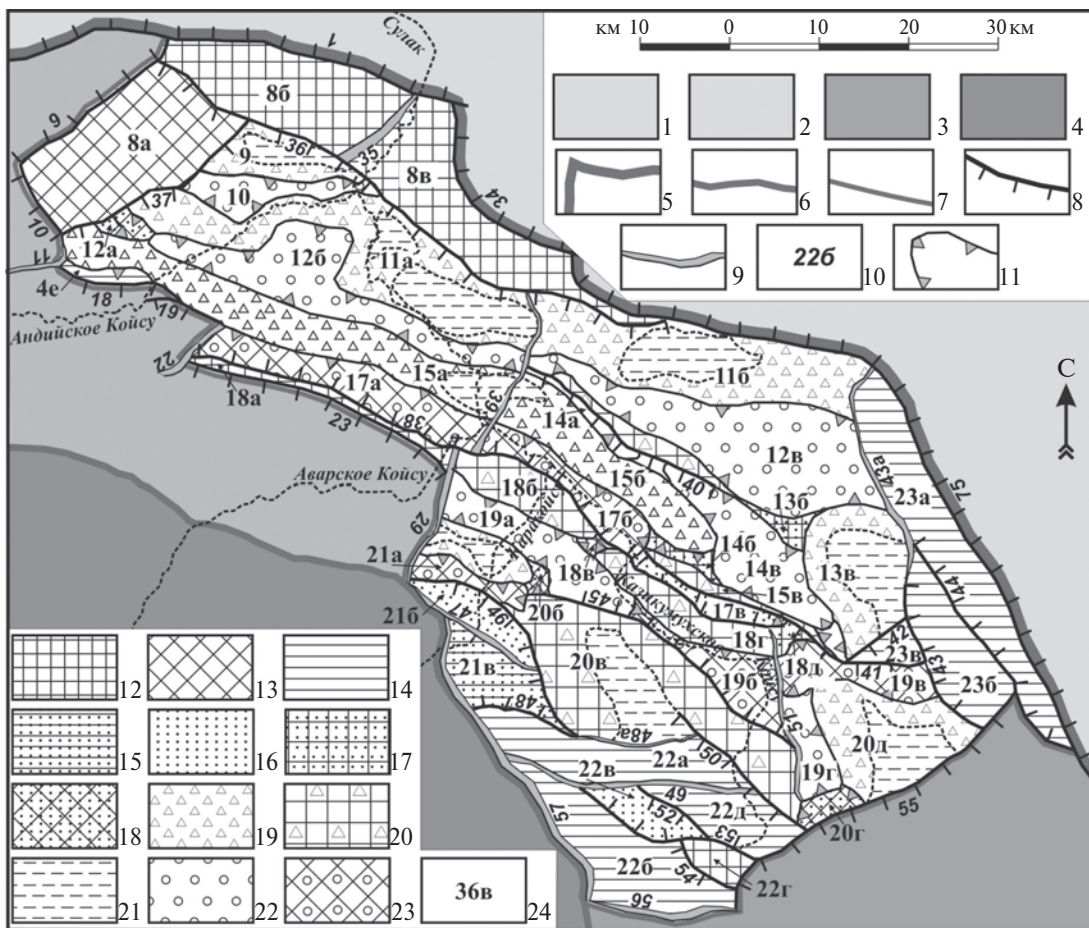


Рис. 3. Схема неструктурного районирования Восточной подзоны Северо-восточной зоны Восточного сегмента. 1 – Терско-Каспийский краевой прогиб; 2–3 – подзоны Северо-восточной зоны: 2 – Западная, 3 – Южная; 4 – Зона центральных поднятий; 5–7 – границы: 5 – Мегасвода Большого Кавказа, 6 – зон, 7 – подзон; 8 – сбросы; 9 – флексуры; 10 – номера разрывов и флексур (см. табл. 2); 11 – пликативные сочленения; 12–23 – типы блоковых и складчатых структур Восточной подзоны: 12 – горсты, 13 – горст-ступени, 14 – ступени, 15 – грабен-ступени, 16 – грабены, 17 – перемычки, 18 – седловины, 19 – антиклинали, 20 – горст-антиклинали, 21 – днища размытых сводов антиклиналей, 22 – синклинали, 23 – грабен-синклинали; 24 – номера блоковых структур (см. табл. 1).

Северная гряда горстов (8) обрамляет северный и северо-восточный края Восточной подзоны. На западном краю этой гряды по Буцахскому (10) и Ишхойламскому (9) сбросам с Западной подзоной граничат прямоугольная Суябимеэрская горст-ступень (8а) и субширотный Салатауский горст (8б). Продолжением последнего к востоку служит Гимринский горст (8в). Проходящие вдоль северного края двух последних горстов краевые Дартендук-Салатауский (1) и Северогимринский (34) сбросы ограничивают эту часть мегасвода Большого Кавказа.

К южному сочленению Суябимеэрской горст-ступени (8а) и Салатауского горста (8а) примыкает Салатауская антиклиналь с размытым сводом (9), по южному борту которой протягивается узкая Аргванийская синклиналь (10). К югу от последней и далее вдоль края подзоны и мегасвода проходит Гимринско-Апшинская антиклинальная гряда (11). Она включает две антиклинали с частично

размытыми сводами, разделенные субмеридианальной Западнокудутльской флексурой (39). Западная из этих антиклиналей – Гимринско-Ирганайская (11а) на западе узкая и извилистая (Гимринский фрагмент), на востоке она расширяется и характеризуется размытым сводом (Ирганайский фрагмент). Восточная Кадар-Апшинская антиклиналь (11б) с размытым сводом на севере ограничена северо-западной частью Восточного краевого сброса (75).

Бетлинско-Урминская цепь синклиналей (12) начинается на западе небольшой, срезанной поперечным Рочотльским сбросом (37) Северогабуршинской седловиной (12а). К ней примыкает на востоке протяженная и узкая, но с расширением посередине Бетлинская синклиналь (12б), которая отделяется упоминавшейся выше субмеридианальной Западнокудутльской флексурой (39) от расширяющейся в восточном направлении Урминской синклинали (12в).

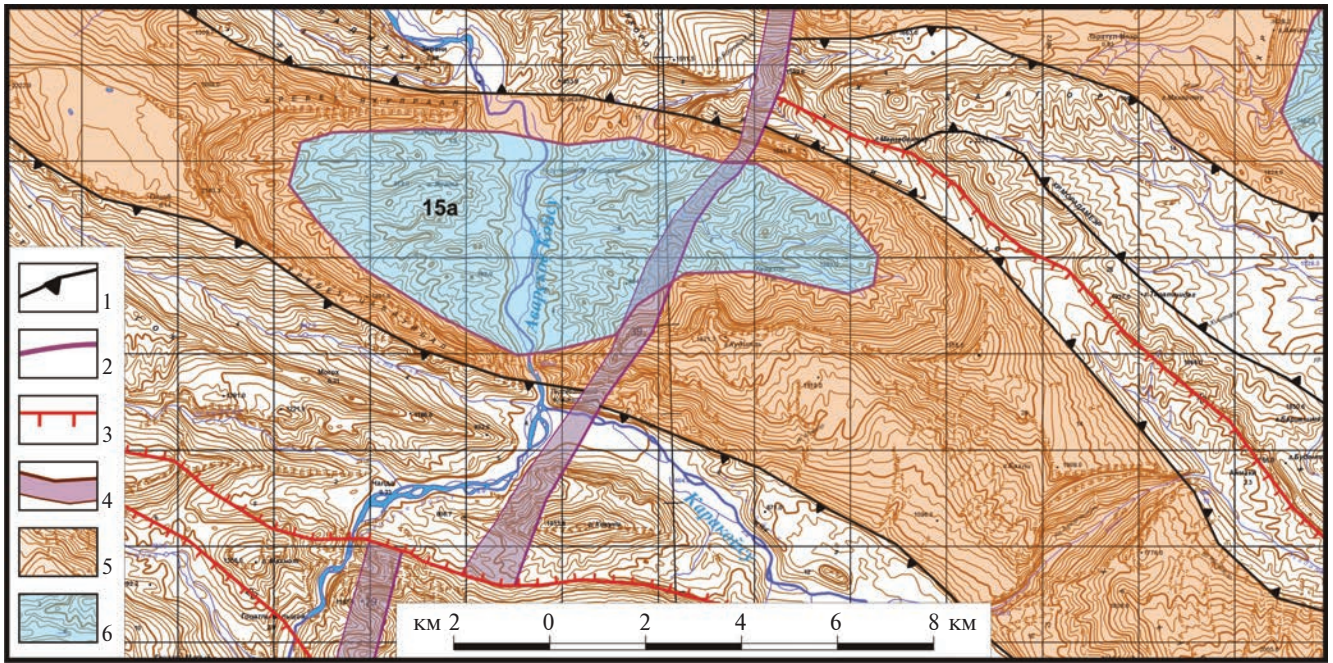


Рис. 4. Аракмеэрская антиклиналь с размытым сводом (15а). 1 – границы пликативных структур; 2 – границы днища размытого свода; 3 – сбросы; 4 – флексуры; 5 – антиклинали; 6 – днища размытых сводов.

На юге Урминская синклинали граничит с Балул-Северомугринской антиклинальной грядой (13), которая состоит из двух разнотипных частей. Западная часть представлена узкими Балулской горст-антиклиналью (13а) с южным бортом, подорванным Балупским сбросом (40) и треугольной Куркурахской перемычкой (13б). Восточной частью этой антиклинальной зоны служит Северомугринская антиклиналь меридианального простирания с обширным размытым сводом (13в) и с основанием, подорванным Варасманским сбросом (42).

Также к востоку от Западнокудутльской флексуры (39) располагается Аймак-Левашинская цепь синклиналей (14). Она начинается на западе узкой Аймакинской грабен-синклиналью (14а), которая отделяется небольшой Орада-Чуглинской перемычкой (14б) от расширяющейся к востоку Левашинской синклинали (14в). Северное крыло первой синклинали, перемычки и части Левашинской синклинали нарушены Балупским сбросом (40). На юге к Левашинской синклинали примыкает Западноварасманская седловина (14г), разделяющая юг Северомугринской антиклинали (13в) и восток Цагналамузской горст-антиклинали (15в).

Протяженная и узкая Аракмеэр-Цагналамузская антиклинальная гряда (15) состоит из двух частей. Западная часть объединяет крупную Аракмеэрскую антиклиналь (15а), свод которой размыт на небольшом протяжении при пересечении этой складки поперечной Западнокудутльской флексурой (39). Юго-восточная часть данной гряды включает широтные маленькую Хохбортскую

перемычку (15б) и более протяженную и узкую Цагналамузскую горст-антиклиналь (15в), южный борт которой оборван Мугинским сбросом (41).

С юга к западному окончанию Аракмеэрской антиклинали (15а) примыкает небольшая и узкая Северокиятлинская синклинали (16), которая по Киятлинскому сбросу (18) граничит с Восточной подзоной. Восточнее вдоль той же

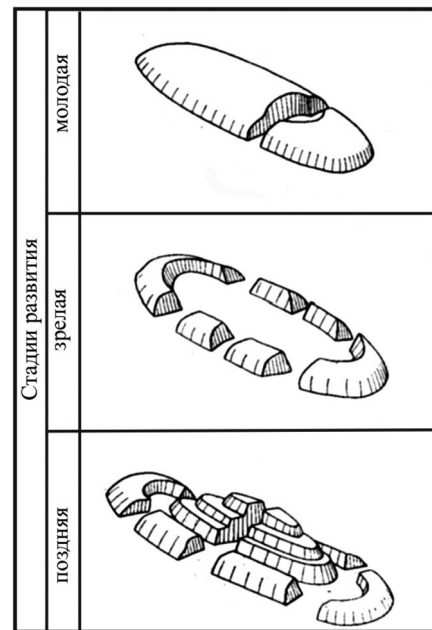


Рис. 5. Стадии развития адырных (антиклинальных) поднятий в рельефе впадин Тянь-Шаня [4].

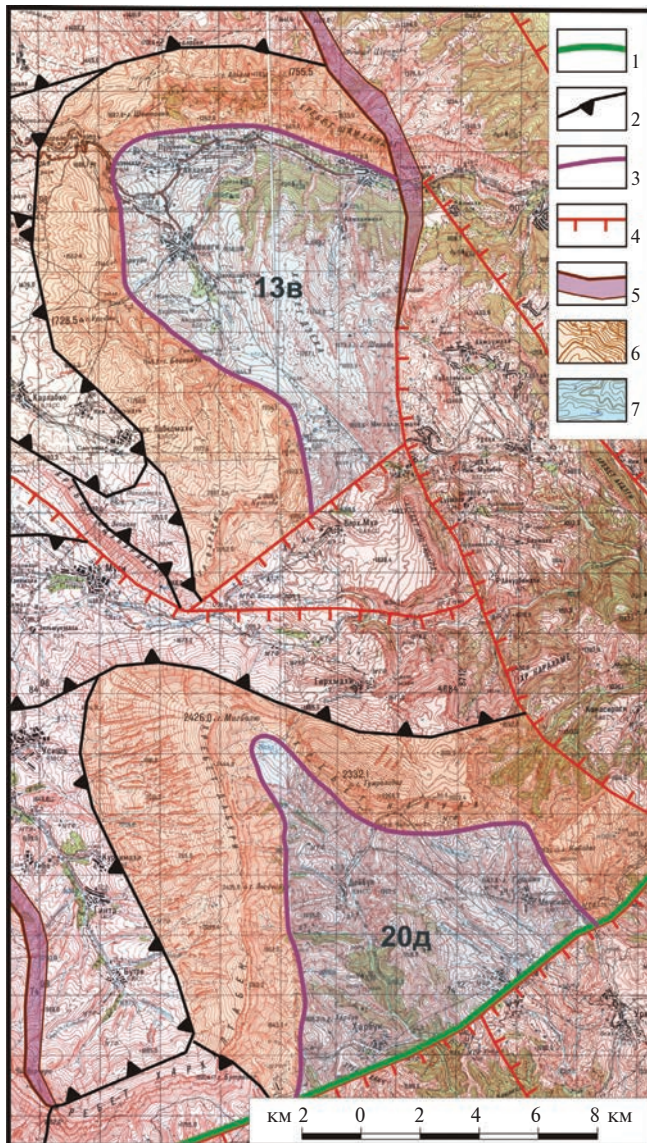


Рис. 6. Северомугринская (13в) и Дейбукская (20д) “полуантиклинали” с размытыми сводами. 1 – граница Восточной и Южной подзон Северо-восточной зоны; 2 – границы пликативных структур; 3 – границы днщ размытых сводов антиклиналей; 4 – сбросы; 5 – флексуры; 6 – антиклинали; 7 – днща размытых сводов.

антиклинали протягивается широкая Мочохская грабен-синклиналь (17а), которая составляет западную часть *Мочохско-Барчуминской цепи грабен-синклиналей* (17). К востоку от поперечной Западнокудутльской флексуры (39) эта цепь продолжается почти столь же широкой Гергебельской грабен-синклиналью (17б), которая далее к юго-востоку надстраивается узким изгибающимся Барчуминским грабеном (17в). Этот грабен обрамляется с севера Мугинским (41), а с юга – Ихгох-Ганцейшалесским (38) сбросами. Ихгох-Ганцейшалесский сброс ограничивает с юга все структуры Мочохско-Барчуминской

грабен-синклинальной цепи. Соответственно, он ограничивает с севера почти все структуры *Ихгохско-Айлитимахинской горст-антиклинальной гряды* (18). Эта гряда начинается на западе очень узким Ихгохским горстом (18а), являющимся пограничной южной структурой, стыкующейся по Южноихгохскому сбросу (23) со структурами юго-восточного выступа Западной подзоны. Далее к востоку после поперечной (меридионального простирания) Маалийской флексуры (29) рассматриваемая гряда представлена широкой Гергебельгэсской горст-антиклиналью (18б), которая сочленяется на юго-востоке с Амалтенской размытой седловиной (18в), а та, в свою очередь – с изогнутой Айлитимахинской горст-антиклиналью (18г). Последняя отделяется северным концом Инзимахинской меридиональной флексуры (51) от небольшой Кавкамахинской перемычки (18д).

Следующая к югу *Рагданчай-Усишская цепь грабен-синклиналей* (19) является северной из группы структур, начинающихся на западе от меридиональной Маалийской флексуры (29), которая служит границей с юго-восточным выступом Западной подзоны. Рассматриваемая цепь грабен-синклиналей начинается довольно широкой Рагданчайской синклиналью (19а), которая продолжается к юго-востоку сначала очень узкой, но расширяющейся далее Акушинской грабен-синклиналью (19б). Ее южный борт также, как и южный торец Рагданчайской синклинали (19а) ограничивается Дубримахинским сбросом (45), а восточный край Акушинской грабен-синклинали определяется меридиональной Инзимахинской флексурой (51). К востоку от этой флексуры рассматриваемая цепь грабен-синклиналей раздваивается. Ее северная субширотная ветвь представлена Герхмахинской грабен-синклиналью (19в) с северным крылом, подорванным Мугинским сбросом (41). Южная ветвь, примыкающая на западе к Инзимахинской флексуре (51), представлена Усишской синклиналью (19г).

Следующая к югу *Хиндах-Дейбукская антиклинальная гряда* (20) включает три разномасштабных антиклинали с размытыми сводами, разделенных небольшими седловинами. Западная, относительно небольшая, широтного простирания Хиндахская антиклиналь с размытым сводом (20а) отделяется маленькой изгибающейся Кегерской седловиной (20б) от очень большой Североуллучарской горст-антиклинали северо-западного простирания с размытым сводом (20в). Ее юго-западный борт нарушен Западночохским сбросом (46), а на юге она срезается широтной Унчукатльской флексурой (48а) и Уллучараским сбросом (50) северо-западного простирания. На востоке северо-восточный край этой горст-антиклинали отделяется южным концом Инзимахинской меридиональной флексуры (51) от Усишской синклинали (19г), а южнее, восточный край Североуллучарской горст-антиклинали (20в) отделяется Бутридагской седловиной (20г) от крупной субмеридионального

простирается Дейбужской антиклинали с размытым сводом (20д). Эта антиклиналь и Бутридагская седловина срезаются с юга субширотным Харбуцким сбросом (55), который служит границей Восточной и Южной подзон.

Гуниб-Нахорухская цепь прогибов (21) является западной краевой структурой, граничащей по субмеридианальным Маалийской (29) и Бацадинской (57) флексурам с подзоной Бокового хребта (и зоной Центральных поднятий). Эта цепь включает субширотную Гунибскую грабен-синклиналь (21а), Ругуджинский грабен (21б) и Нахорухскую грабен-ступень (21в). Ругуджинский грабен ограничен с севера дугообразным Западночохским сбросом (46), а с юга – Ругуджинской флексурой (47). Нахорухская грабен-ступень ограничивается с юга Северошангодским сбросом (48).

Юго-западная краевая группа блоков (22) Восточной подзоны представлена на севере широтной Бухтынской ступенью (22а), которая с севера ограничена Северошангодским сбросом (48) и продолжающей его к востоку Унчукатльской флексурой (48а), а с юга – также широтной Кумухской флексурой (49). К югу от последней располагаются: на западе Вачинская ступень (22б), в середине – Нижнехуннижский грабен (22в) и Шунудагский горст (22г), а на востоке – Сарикабуская ступень (22д).

Эти структуры разделены Восточновихлиским (52), Шовкраским (53) и Мурсурским (54) сбросами северо-западного простирания. С юга вся эта группа блоков отделяется Сумбатльской флексурой (56) и Харбуцким сбросом (55) от структур Южной подзоны.

Восточная краевая группа ступеней (23) включает три последовательно увеличивающихся в размерах ступени. Самая маленькая, треугольной формы Верхнемудебкинская ступень (23в) расклинивает северную Северомугринскую антиклиналь с размытым сводом (13в) и Герхмахинскую грабен-синклиналь (19в), отделяясь от них по Варасманскому (42) и Мугинскому (41) сбросам. Восточнее располагаются Урахинская (23б) и краевая Шамхалдагская (23а) ступени. Последняя на востоке граничит с краевым прогибом по Восточному краевому сбросу (75). Урахинская ступень ограничена с востока Аталгинским сбросом (44), а с запада – Кицтубурским сбросом (43) и южным окончанием Дегвайской флексуры (43а).

2.3. Южная подзона

Южная подзона объединяет различно ориентированные группы блоков: Северную, Восточную, Центральную и Западную (рис. 7).



Рис. 7. Схема неоструктурного районирования Южной подзоны Северо-восточной зоны Восточного сегмента. 1 – Терско-Каспийский краевой прогиб; 2 – Восточная подзона Северо-восточной зоны; 3–5 – Зона центральных поднятий: 3 – подзона Бокового хребта, 4 – подзона Осевых прогибов; 5 – подзона Главного хребта; 6–8 – границы: 6 – Мегасвода Большого Кавказа, 7 – зон, 8 – подзон; 9 – сбросы; 10 – флексуры; 11–16 – типы блоковых структур Южной подзоны: 11 – горсты, 12 – горст-ступени, 13 – ступени, 14 – грабен-ступени, 15 – грабены, 16 – седловины; 17–18 – номера структур: 17 – блоковых (см. табл. 1), 18 – разрывов и флексур (см. табл. 2).

Южная подзона объединяет блоковые структуры, обычно более крупные по площади, чем складчатые структуры Восточной подзоны. Характерно, что рубеж между этими подзонами представляет собой практически прямолинейный разрывно-флексурный поперечник, включающий с запада на восток Сумбатальскую флексуру (56), Харбукский сброс (55) и южный фрагмент Алтагирского сброса (44). Западный борт на границе с Зоной Центральных поднятий определяется Тукуилдалыкским сбросом (72), восточный край – Восточным краевым сбросом (75), а южный – Нижнесамурским сбросом (74).

Северная группа блоков (24) включает три последовательно снижающихся к востоку ступени: Кулийскую ступень (24а), Убардабанскую ступень (24б) и широкую, почти квадратную в плане Кубачинскую грабен-ступень (24в). Они разделены субмеридианальными Кокмадагским (60) и Чинганским (59) сбросами, а с юга ограничены Аккусандейским широтным сбросом (61).

Восточная краевая группа блоков (25) объединяет северную, почти изометричной формы, Уркарахскую ступень (25а), чрезвычайно узкий прибортовой Карасыртский горст (25б) и очень большую меридианальную Кабирскую грабен-ступень (25в). Они последовательно ограничены с запада Восточнокубачинским (58), Карасыртским (64) и Уллучай-Курахским (63) сбросами.

С востока их ограничивают Восточный краевой сброс (75) и надстраивающая его к югу широкая Исликская флексура (75а).

Западная краевая группа блоков (27) включает с севера на юг узкие Ричайскую ступень (27а), большой Верхнекурахский грабен (27б) и Рунердагскую ступень (27в) треугольной формы. С запада эта группа ограничена Тукуидалыкским сбросом (72), с востока – Хургабек-Питадагским (68), Карахским (69) сбросами, Бедюкской флексурой (71), Кологдагским сбросом (70) и южным фрагментом Уллучай-Курахского сброса (63). Рунердагская ступень (27в) ограничена с северо-запада Кутулским сбросом (73).

3. ЗОНА ЦЕНТРАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ ВОСТОЧНОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА

Зона центральных поднятий включает подзоны Бокового и Главного хребтов, разделенные подзоной Осевых прогибов (рис. 8, 9).

3.1. Подзона Бокового хребта

Подзона Бокового хребта объединяет: Кобуламское поднятие (28), Северо-восточную краевую группу ступеней (29), Центральное поднятие Бокового хребта (30), Юго-восточную группу горстов (31).

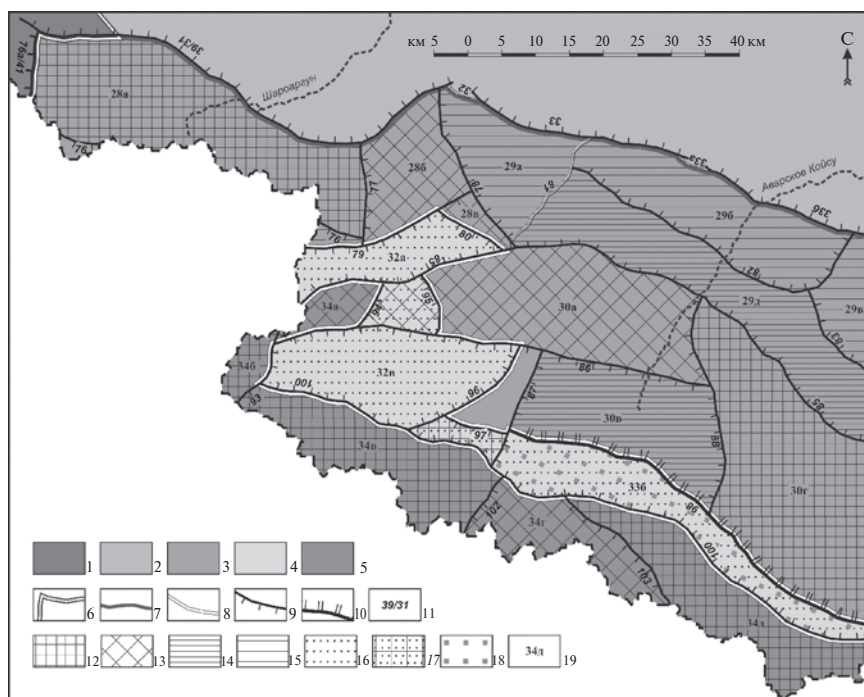


Рис. 8. Схема неструктурного районирования западной части зоны Центральных поднятий Восточного сегмента. 1 – Казбекский сегмент; 2 – Северо-восточная зона; 3–5 – подзоны Зоны центральных поднятий: 3 – подзона Бокового хребта, 4 – подзона Осевых прогибов; 5 – подзона Главного хребта; 6–8 – границы: 6 – сегментов, 7 – зон, 8 – подзон; 9 – сбросы; 10 – взбросы; 11 – номера разрывов (см. табл. 2); 12–18 – типы блоковых структур зоны Центральных поднятий: 12 – горсты, 13 – горст-ступени, 14 – высокие ступени, 15 – ступени, 16 – грабены, 17 – перемычки, 18 – шовно-депресссионная зона; 19 – номера блоковых структур (см. табл. 1).

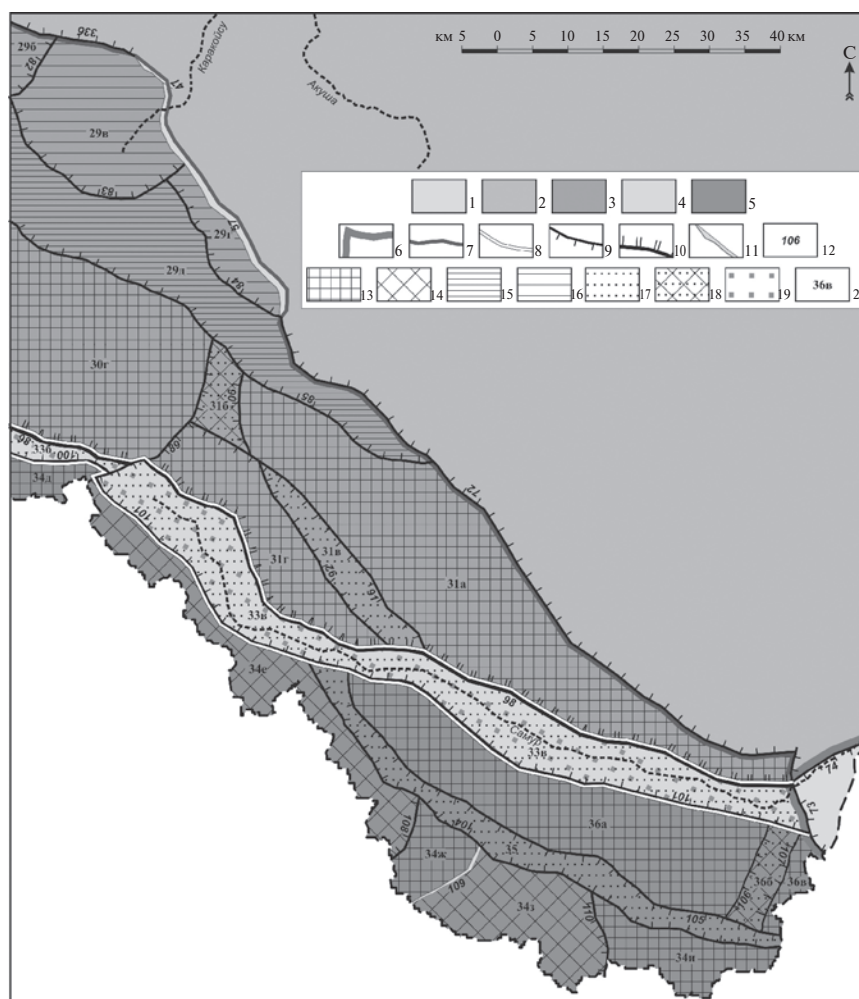


Рис. 9. Схема неоструктурного районирования восточной части зоны Центральных поднятий Восточного сегмента. 1 – Кусарский краевой прогиб; 2 – Северо-восточная зона; 3–5 – подзоны Зоны центральных поднятий: 3 – подзона Бокового хребта, 4 – подзона Осевых прогибов; 5 – подзона Главного хребта; 6–8 – границы: 6 – ме-гасвода, 7 – зон, 8 – подзон; 9 – сбросы; 10 – взбросы; 11 – флексуры; 12 – номера разрывов и флексур (см. табл. 2); 13–19 – типы блоковых структур зоны Центральных поднятий: 13 – горсты, 14 – горст-ступени, 15 – высокие ступени, 16 – ступени, 17 – грабены, 18 – седловины, 19 – шовно-депресссионная зона; 20 – номера блоковых структур (см. табл. 1).

Кобуламское поднятие (28) включает на западе прямоугольный Кобуламский горст (28а), который на юге отделяется Тушетско-Акарабакским сбросом (76) от узкой Тебулинской ступени (28г). С севера эти две фронтальные структуры ограничиваются Вегилам-Снеговым сбросом (31/39), с юга – Хушетским сбросом (79), с востока – Снеговым сбросом (77), а с запада – Ацунта-Маистийским сбросом (76а/41) на границе с Казбекским сегментом. Данное поднятие заканчивается на востоке двумя небольшими блоками: квадратной формы – Саситлийской горст-ступенью (28б) и отходящей от нее к юго-востоку узкой Хваршинской горст-ступенью (28в), которые на востоке ограничиваются по Купигунийскому сбросу (78).

Северо-восточная краевая группа ступеней (29) начинается на западе имеющей треугольную форму Тиндинской ступенью (29а), которая

отделяется Тиндинской флексурой (81) от узкой и протяженной Ругольдаской высокой ступени (29д). Последняя с юга граничит по Бежира-Чультынскому сбросу (85) со структурами Центрального поднятия (30), а на севере сопровождается тремя менее крупными и более низкими ступенями, отделяясь от них, соответственно, по трем дугообразным сбросам: Гамчильскому (82), Ценебскому (83) и Канарскому (84). Западная из этих ступеней – Хебдинская (29б) имеет прямоугольную, средняя – Цирибская (29в) – овальную, а третья – Хулисмаяская (29г) – узкую клиновидную форму. На севере эта группа ступеней граничит по серии краевых структур: Гигатлигэскому сбросу (33), короткой Изанийской флексуре (33а), Болнухскому сбросу (33б), западу Ругуджинской флексуры (47) и Бацадинской флексуры (57) со структурами Восточной и Южной подзон Северо-восточно зоны.

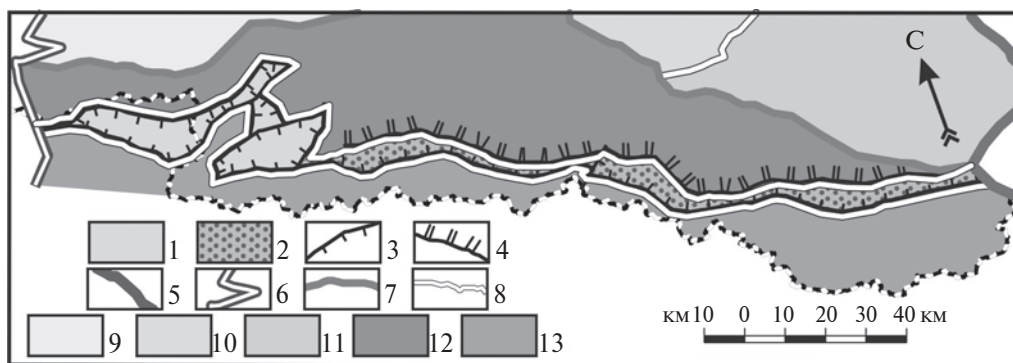


Рис. 10. Строение подзоны Осевых прогибов. 1–2 – грабены подзоны Осевых прогибов: 1 – Северо-западная группа грабенов, 2 – Бежтино-Самурская шовно-депресссионная зона; 3–4 – разрывы: 3 – сбросы, 4 – взбросы; 5–8 – границы: 5 – мегасвода Большого Кавказа, 6 – сегментов мегасвода, 7 – зон, 8 – подзон; 9–11 – подзоны Северо-восточной зоны: 9 – Западная, 10 – Восточная; 11 – Южная; 12–13 – подзоны зоны Центральных поднятий: 12 – Бокового хребта, 13 – Главного хребта.

Центральное поднятие Бокового хребта (30) имеет на западе “зубчатую” разрывную границу с грабенами запада Подзоны осевых прогибов. К этой границе подходит крупная Кадская (30а) и маленькая узкая Богосская (30б) грабен-ступени. К югу от первой из них, граница по Гирискому сбросу (86) располагается Анцухская высокая ступень (30в), имеющая прямоугольную форму. Эта высокая ступень и Кадская горст-ступень (30а) отделяются с востока по Нукулорскому поперечному сбросу (88) от обширного, в целом прямоугольного Гечбичского горста (30г). Этот горст и Анцухская высокая ступень (30в) граничат на юге по Тляратинскому взбросу (98) с Бежтинским грабеном (33б) из подзоны Осевых прогибов. Гечбичский горст (30г) по Верхнесамурскому поперечному сбросу (89) отделяется от *Юго-восточной группы горстов* (31). К этому сбросу примыкает на севере небольшая и узкая Лаказанская седловина (31б), а южнее – западный торец протяженного Хултайдагского горста (31г). К упомянутой седловине с востока по Балиалскому сбросу (90) примыкает протяженный, широкий в центре и сильно суживающийся на востоке Самурский горст (31а). Он по Катрухскому сбросу (91) граничит с узким (шелевидным) Карасамурским грабеном (31в), который с юга отделяется Ихрекским сбросом (92) от Хултайдагского горста (31д). Вся Юго-восточная группа горстов сопрягается с протяженным Самурским грабеном (33в) по Южнобежтинскому сбросу (100).

3.2. Подзона Осевых прогибов

Подзона Осевых прогибов включает: Северо-западную группу грабенов (32) и Бежтино-Самурскую шовно-депресссионную зону (33). Подзона Осевых прогибов пересекает весь Восточный сегмент мегасвода (рис. 10).

Северо-западная группа грабенов (32), в которой наиболее крупные грабены ориентированы диагонально к общему простиранию подзоны Осевых прогибов. Эта группа представлена в основном двумя крупными грабенами диагональной ориентировки. Из-за этого их общие контуры извилисты. Северный Верхнеандийский грабен (32а) дугообразен и западным торцом примыкает к Хевсуретской поперечной седловине (15) из Казбекского сегмента. С севера этот грабен отделен Хушетским (79) и Устьхваршинским (80) сбросами от Кобуламского поднятия (28). С юга он ограничен западной частью Бежира-Чультынского сброса (85) от небольшой Метлютской седловины (32б) и примыкающих к ней окончаний Центрального поднятия (Кадская горст-ступень – 30а) и Осевой гряды подзоны Главного хребта (Кириотинская горст-ступень – 34а). К югу от Метлютской седловины, отделяясь от нее Гарийским сбросом (86), располагается второй крупный грабен – Кидеройский (32в), имеющий в целом прямоугольную форму, но с дугообразным восточным бортом, определяемым Восточногенухским сбросом (97). Западным краем грабена служит Кабданский сброс (93), а южным – западная часть извилистого Южнобежтинского сброса (100).

Далее к востоку почти на 150 км протягивается *Бежтино-Самурская шовно-депресссионная зона* (33), ориентированная в целом с северо-запада на юго-восток. Она делится поперечным сбросом на два крупных самостоятельных грабена. С северо-востока зона ограничена взбросом, а с юго-запада – сбросами. По характеру ограничивающих данную зону разрывных структур она ближе к Садонской шовно-депресссионной зоне.

Бежтино-Самурская шовно-депресссионная зона (33) начинается на западе небольшой прямоугольной формы Верхнехзанорской перемычкой (33а), ограниченной с востока поперечным Восточнобогосским сбросом (87),

а с севера – Восточногенухским сбросом (97). С юга она и расположенный восточнее длинный, изгибающийся Бежтинский грабен (33б) ограничены Южнобежтинским сбросом (100). Суженная восточная часть Бежтинского грабена отделяется по Верхнесамурскому поперечному сбросу (89) от более широкого изгибающегося Самурского грабена (33в). Этот грабен ограничен с севера Восточнотляратинским взбросом (99), с юга – Кусур-Мискинджийским сбросом (101), а с юго-востока – поперечным Кутулским сбросом (73).

3.3. Подзона Главного хребта

Подзона Главного хребта в пределах России включает: Осевую гряду горстов (34), Верхнеахтычайский грабен (35) и Северо-восточную гряду горстов (36). Данная подзона попадает в пределы России только своей северной частью.

Здесь основной является *Осевая гряда горстов* (34). На западе в пределах России находятся ее Кириотинская горст-ступень (34а) и часть Шавиклинского горста (34б). Он разделяется и отделяется от более восточных структур Кабданским сбросом (93), к востоку от которого расположен Богосский горст (34в). Он, в свою очередь, отделен поперечным Какитльским сбросом (102) от южной Ношимарской горст-ступени (34г), которая отделяется Созольским диагональным сбросом (103) от Гутонского горста (34д). Эта часть Осевой гряды горстов ограничена с севера Южнобежтинским сбросом (100).

Гутонский горст (34д) по Верхнесамурскому поперечному сбросу (89) граничит с обширной Ахвайской горст-ступенью (34е), которая на востоке отделяется по Джюмайскому поперечному сбросу (108) от небольшого прямоугольного Базыкинско-го горста (34ж). Последний отделен поперечной Даличайской флекурой (109) от Цайлаханской горст-ступени (34з). А она по Западномалкамудскому сбросу (110) граничит с Базардюзинским горстом (34и). Четыре последние указанные выше блоковые структуры граничат на севере с узким, протяженным и дугообразно изогнутым *Верхнеахтычайским грабеном* (35). Этот грабен западным торцом подходит к Самурскому грабену (33в), а на востоке уходит за пределы России. Северным краем Верхнеахтычайского грабена служит Чарисина-Шахдагский сброс (105), которым он отделяется от Шалбуздаг-Шахдагской гряды горстов (36), граничащей на севере с Самурским грабеном (33в) по Кусур-Мискинджийскому сбросу (101). Гряда включает протяженный западный Шалбуздагский горст (36а), узкую Микрахскую седловину (36б) и западную часть Шахдагского горста (36в). Седловина ограничена короткими поперечными сбросами: с запада – Микрахским (106), а с востока – Каладжухским (107).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение оротектонического метода позволило существенно детализировать предлагавшиеся ранее схемы неотектонического районирования Восточного сегмента мегасвода Большого Кавказа. В Российской части сегмента прослежены зоны Северо-восточная и Центральная поднятий. В пределах Северо-восточной зоны выделены Западная, Восточная и Южная подзоны, различающиеся по своему строению и ориентировке основных структур. В Западной и Южной подзонах преобладают блоковые структуры, а в Восточной – складчатые. Среди антиклинальных складок встречаются складки с размытыми сводами, а также складки, сохранившиеся частично.

Зона Центральные поднятий включает подзоны Бокового и Главного хребтов, разделенные подзоной Осевых прогибов. Подзона прогибов пересекает весь Восточный сегмент мегасвода и включает Северо-западную группу различно ориентированных грабенов и восточную Бежтино-Самурскую шовно-депресссионную зону с продольными грабенами. Данная зона и ее подзоны ограничены наиболее крупными сбросами и взбросами. Большинство региональных и локальных структур разделено активными сбросами взбросами, которые могут оказаться опасными при оценке устойчивости инженерных сооружений.

Полученные оригинальные данные, отсутствующие в стандартных материалах по геологической съемке на этой территории, полезны для строительного проектирования и геоэкологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянова В.Н., Баулин Ю.И., Кофф Г.Л. и др.* Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. М.: [б. и.], 1996. 107 с.
2. *Криволицкий А.Е.* История формирования складчатых структур и вопросы верхнемезозойской складчатости Дагестана // *Материалы по геологии и металлогении Центрального и Западного Кавказа*. Вып. 6. М.: Госгеолтехиздат, 1960. С. 64–77.
3. *Милановский Е.Е.* Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 484 с.
4. *Несмеянов С.А.* Развитие поднятий в межгорных впадинах Тянь-Шаня // *ДАН СССР*. 1974. Т. 216. № 6. С. 1360–1363.
5. *Несмеянов С.А.* Развитие адырных поднятий в межгорных впадинах Тянь-Шаня. // *Структурная геоморфология горных стран*. М.: Наука, 1975. С. 166–170.
6. *Несмеянов С.А.* Оротектонический метод. Краткое методическое руководство. М.: ООО “Миттель Пресс”, 2017. 104 с.
7. *Никитин М.Ю.* Неотектоника Восточного Кавказа // *Бюлл. МОИП. Отд. Геологии*. 1987. Т. 62. Вып. 3. С. 21–36.
8. *Сорский А.А., Шолно В.Н.* История развития и механизм образования коробчатых складок Известнякового Дагестана // *Складчатые деформации*

- земной коры, их типы и механизмы образования. М.: АН СССР, 1962. С. 134–170.
9. Тектоническая карта Дагестана масштаба 1:500 000 (объяснительная записка) под ред. Ю.Г. Леонова // Тр. ИГ ДНЦ РАН. Вып. 60. Махачкала. 2012. 130 с.
 10. Шатский Н.С. Геологическое строение восточной части Черных гор и нефтяные месторождения Миатлы и Дылым (Северный Дагестан) // Тр. Гос. н.-и. нефт. ин-та. Вып. 4. 1929. М.: Изд-во Науч.-технич. упр-ния ВСХ, 284 с.
 11. Шолпо В.Н., Рогожин Е.А., Гончаров М.А. Складчатость Большого Кавказа. М.: Наука, 1993. 192 с.

NEOSTRUCTURAL ZONING OF THE RUSSIAN PART OF THE GREATER CAUCASUS MEGAVULT, THE EASTERN SEGMENT (ADVANCED STUDIES FOR ENGINEERING SURVEY)

S. A. Nesmeyanov^a, M. Yu. Nikitin^b, O. A. Voeikova^{a,#}, M. N. Komarevskaya^a

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty,
Leninskie Gory, 1, Moscow, 119899 Russia*

[#]*E-mail: voa49@mail.ru*

The use of the orotectonic method made it possible to detail significantly the previously proposed schemes of neotectonic zoning of the Eastern segment of the Greater Caucasus megavault. In the Russian part of the segment, the zones of the North-Eastern and Central uplifts are traced. Within the North-Eastern zone, Western, Eastern and Southern subzones are distinguished, differing in their structure and orientation of the main structures. Block structures predominate in the Western and Southern subzones, and folded ones in the Eastern subzones. Among the anticlinal folds, there are folds with eroded arches, as well as folds that are partially preserved. The zone of the central uplifts includes the subzones of the side and main ridges, separated by the subzone of the axial troughs. The trough subzone crosses the entire Eastern segment of the megavault and includes the Northwestern group of differently oriented grabens and the eastern Bezhtino-Samur suture-depression zone with longitudinal grabens. This zone and its subzones are limited by the largest faults and reverse faults. Most regional and local structures are separated by active faults, which may be dangerous for the stability of engineering structures. The obtained original data, which is not available in standard materials on geological surveying for a given area, is useful for construction design and geocology.

Keywords: *megavault, segment, zone, subzone, suture zone, horst, structural step, graben, anticline, syncline, fault, reverse fault, flexure*

REFERENCES

1. Aver'yanova, V.N., Baulin, Yu.I., Koff, G.L. [Complex assessment of seismic hazard in the territory of Grozny]. Moscow, 1996, 107 p. (in Russian)
2. Krivolutskii, A.E. [History of the formation of folded structures and issues of the Upper Mesozoic folding of Dagestan]. In: [Articles in geology and metallogeny of the Central and Western Caucasus]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., issue 6, 1960, pp. 64–77. (in Russian)
3. Milanovskii, E.E. [The Newest tectonics of the Caucasus]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 484 p. (in Russian)
4. Nesmeyanov, S.A. [Development of uplifts in the intermountain depressions of the Tien Shan]. *DAN SSSR*, 1974, vol. 216, no. 6, pp. 1360–1363. (in Russian)
5. Nesmeyanov, S.A. [Development of adyr uplifts in the intermountain depressions of the Tien Shan.]. In: [Structural geomorphology of mountain areas]. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 166–170. (in Russian)
6. Nesmeyanov, S.A. [Orotectonic method]. Moscow, Mittel Press, 2017, 376 p. (in Russian)
7. Nikitin, M.Yu. [Neotectonics of the Eastern Caucasus]. *Byull. MOIP. Otd. Geologii*, 1987, vol. 62, no. 3, pp. 21–36. (in Russian)
8. Sorskii, A.A., Sholpo V.N. [History of development and mechanism of formation of box folds in Limestone Dagestan]. In: [Fold deformations of the Earth crust, their types and formation mechanisms]. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1962, pp. 134–170. (in Russian)
9. [Tectonic map of Dagestan scale 1:500,000 (explanatory note), Yu.G. Leonov (ed)]. *Proc. of Institute of Geology, Dagestan Scientific Center RAS, Makhachkala*, 2012, issue 60, 130 p. (in Russian)
10. Shatskii, N.S. [Geological structure of the eastern part of the Black Mountains and the oil fields of Miately and Dylm (Northern Dagestan)]. *Proc. of State Research Oil Institute*, 1928, issue 4. (in Russian)
11. Sholpo, V.N., Rogozhin, E.A., Goncharov, M.A. [Folding of the Greater Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 192 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 504.062.2

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГЕОСИСТЕМ ВОРОБЬЕВЫХ ГОР: ИСТОРИЯ, ИЗУЧЕНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2024 г. Т. А. Барабошкина^{1,*}, Е. Н. Самарин^{1,*}, И. В. Аверин^{2,**}, Р. Ю. Жидков^{3,***},
Н. Н. Ракитина^{3,***}, И. А. Родькина^{1,*}, В. С. Руцкина^{4,****}, Т. Н. Лубкова^{1,*}, О. А. Липатникова^{1,*}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119234 Россия

²ООО “Инженерная Геология”, ул. Ярцевская, 16, пом. 1, Москва, 121351 Россия

³Государственное бюджетное учреждение “Московский городской трест геолого-геодезических
и картографических работ”, ул. Зорге, 1, Москва, 123308 Россия

⁴ООО “МедБридж”, ул. 5-я Магистральная, 20, Москва, 123007 Россия

*E-mail: ecolab@mail.ru

**E-mail: i.averin@mail.ru

***E-mail: rzhidkov@gmail.com

****E-mail: geovera@bk.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 15.11.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

На базе методологии междисциплинарных исследований решены задачи ретроспективного анализа данных о качестве ресурсного потенциала компонентов геосистем территории природного заказника Воробьевы горы, расположенного в границах г. Москва, в целях совершенствования программ устойчивого развития потенциала его эколого-просветительской функции. На основе комплексных подходов систематизирован уникальный опыт успешного функционирования рекреационной территории синхронно с социально-экономическим развитием агломерации. Выполнено доизучение отдельных частей его территории, идентифицированы локальные участки разновекторной динамики геосистем различного генезиса, дифференцирована роль природных и природно-антропогенных факторов в формировании геоэкологических особенностей территории заказника. Самые ценные дендрологические объекты приурочены к днищам оврагов и районам стабилизировавшихся оползневых массивов, вследствие минимального уровня освоения данных геосистем сторонними пользователями. Разработана модель пространственного распространения массивов техногенных отложений с наиболее уязвимыми компонентами геосистем, что важно учитывать в проектах комплексного благоустройства долины р. Москва.

Ключевые слова: *особо-охраняемые природные территории, рекреация, устойчивое развитие мегаполиса, модель распространения техногенных отложений, эколого-просветительная функция, агломерация*

DOI: 10.31857/S0869780924020029; EDN: DZXUCI

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным Организации Объединенных Наций, к 2050 г. городское население мира увеличится почти вдвое, а по динамике показателей изменения компонентов среды, урбанизация является одним из лидеров преобразования геосистем XXI в. Большую роль для устойчивого развития городов играют парковые и особо-охраняемые природные территории (ООПТ).

Активное развитие г. Москвы – одного из крупнейших мегаполисов Евразии – идет перманентно, начиная с эпохи промышленной революции, на базе интенсификации развития энергетических,

транспортных и других структур урбопромышленных комплексов. Расширение городской черты Московского мегаполиса к началу XXI в. предопределило современное положение ООПТ “Воробьевы горы” практически в центральной части города (рис. 1). На базе природного заказника накоплен положительный опыт освоения ресурса городского пространства для решения задач в сфере рекреационных, средозащитных, санитарных и эколого-просветительских функций.

Высокий уступ Теплостанской возвышенности (правый берег Лужнецкой излучины Москва-реки) на 60–70 м возвышается над урезом

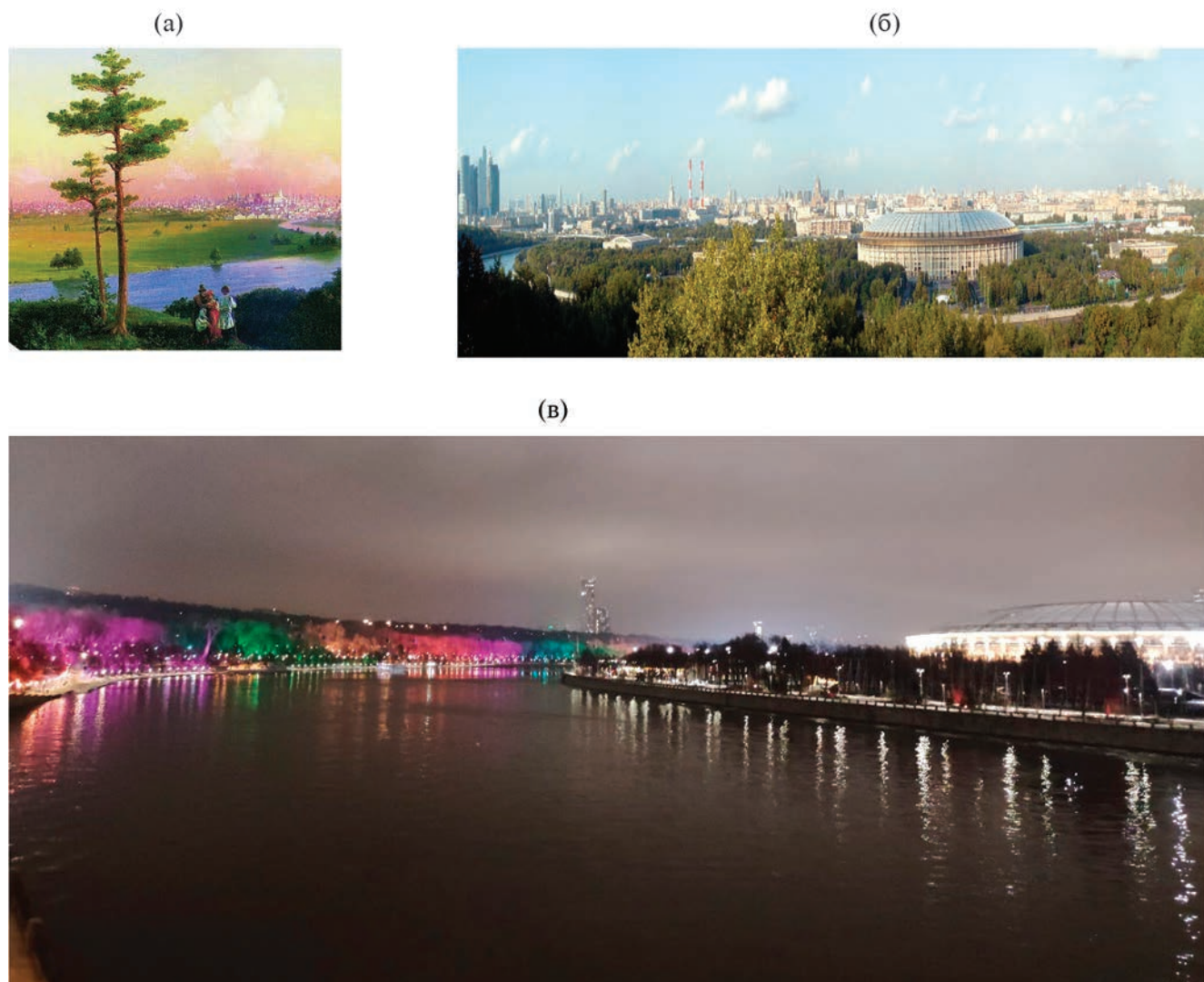


Рис. 1. Визуальная ретроспектива динамики геосистем ООПТ в районе Лужнецкой излучины р. Москва: а – в XIX в. (по картине И.К. Айвазовского, 1848) [1], б – в XXI в. [8], в – фотофиксация склона Воробьевых гор с метромоста (Т.А. Барабошкина, 2023).

воды. Крутой склон долины рассечен глубокими балками, осложнен оползновыми процессами. Совокупность геолого-геоморфологических факторов сыграла значимую роль в ограничении использования природно-ресурсного потенциала района под градостроительную деятельность.

В исторический период 1935–1991 гг. территория имела название Ленинские горы и преимущественно относилась к сфере рекреационной экономической деятельности. В 1998 г. Воробьевы (Ленинские) горы, согласно постановлению Правительства Москвы № 564, ввели в состав природного комплекса Москвы, как ООПТ. В 2013 г. природный заказник “Воробьевы Горы” присоединен к территории Центрального парка культуры и отдыха (ЦПКиО) им. Горького и Нескучного Сада [21]. В июне 2017 г. проект реконструкции спортивно-туристического комплекса, прошедший

экологическую и историко-культурную экспертизу, получил одобрение жителей [8].

Территория ООПТ “Воробьевы Горы” (по данным ФГБУ “Московский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями”) находится в зоне действия “острова тепла”, сформировавшегося под влиянием дополнительных источников энергии от предприятий, транспорта, утечек из тепловых магистралей и др. [9]. Этот феномен способствует смещению во времени фенофазы у растительности заказника на 7–10 дней по сравнению с их аналогами, произрастающими на загородных территориях [19].

В целях диверсификации потенциала эколого-просветительской функции территории заказника в 2007 г. при поддержке руководства ООПТ

“Воробьевы Горы” В.И. Сеземан и С.Ю. Самсонова [2–4, 13, 23] было начато доизучение его территории на базе системного подхода для уточнения экологического состояния компонентов геосистем и подготовки спектра задач в рамках научно-учебных практик магистрантов [26, 27].

АБИОТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ГЕОСИСТЕМ ООПТ “ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ”

Природный заказник расположен на правом борту долины р. Москва со своеобразным грядово-оползневой рельефом. Максимальные отметки рельефа (до 70 м) фиксируются в районе смотровой площадки, от которой фиксируется постепенное понижение к западу – к устью р. Сетунь, и к востоку – к Нескучному саду [3–5, 28, 30].

Склон Воробьевых гор является восточным краем Теплостанской возвышенности, водораздельное плато которой представляет собой доледниковое эрозионно-тектоническое поднятие, заложившееся в раннеплиоценовое время и развивавшееся на протяжении всего четвертичного периода [16, 18]. Четвертичные образования представлены двумя горизонтами моренных суглинков с дресвой и щебнем, разделенных флювиогляциальными средне- и мелкозернистыми песками и суглинками (суммарно достигая 22–24 м) [28].

Мощность аллювиальных отложений (преимущественно песков) в русловой части долины колеблется от 7 до 10 м. Фрагментарно в основании склона правого борта речной долины прослеживается I надпойменная терраса, сложенная мелкими песками (мощностью не более 5 м). В центральной части заповедника, в районе стадиона, широко развиты техногенные грунты, преимущественно представленные светло-коричневыми суглинками с включением щебня и дресвы магматических пород. Мощность отложений может достигать 10 и более метров.

Большинство исследователей, изучавших оползни Воробьевых гор, рассматривают глинистые отложения оксфордского яруса в качестве основного деформирующегося горизонта оползневых массивов [14, 20]. В связи с этим в пределах склона перекрывающие оксфордские образования, песчано-глинистые верхнеюрские отложения титонского яруса, нижнемеловые, преимущественно песчаные отложения и четвертичные гляциальные, флювиогляциальные образования находятся в оползневом залегании. Протяженность визуально определяемых оползневых участков достигает нескольких сот метров, видимая ширина по осевой части оползня – более трехсот метров. Объем грунтов, вовлеченных в оползневые деформации на рассматриваемом участке, оценивается в 2 млн м³ [5, 30].

Подземные воды напорно-безнапорного надюрского водоносного комплекса залегают в пределах склона Воробьевых гор на глубинах от 1.1 до 38.0 м (абс. отм. 121.0–154.9). Водовмещающими отложениями являются пески разнородные и песчаные прослои в глинах и суглинках четвертичного, нижнемелового и верхнеюрского возраста, залегающие как в ненарушенном, так и в оползневом залегании, а также песчано-глинистые породы русла и I надпойменной террасы Москвы-реки. Нижний водоупор – глинистые отложения верхней и средней юры, мощностью до 30.0 м. В нижней части склона, где в оползневых блоках локально сохранились моренные суглинки, фиксируется напор до 1.3–4.6 м. Питание подземных вод происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, а разгрузка осуществляется в р. Москва и источники в пределах склона. Положение уровня подземных вод обусловлено количеством атмосферных осадков и урезом воды в реке. Поток направлен на северо-восток, в сторону русла реки. По данным ГБУ “Мосгоргеотрест” за период с 1955 г. существенных изменений гидрогеологической обстановки не произошло.

В периоды обильного выпадения осадков или интенсивного снеготаяния в верхней части разреза, преимущественно в техногенных грунтах и среднетертичных флювиогляциальных отложениях вероятно образование водоносного горизонта спорадического распространения типа “верховодки”.

БИОТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ГЕОСИСТЕМ ТЕРРИТОРИИ ООПТ “ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ”

До эпохи интенсивной урбанизации территория Воробьевых гор представляла собой лесной массив из широколиственных пород, вытянутый с севера на юг на 4 км, шириной от 400 до 80 м вдоль правого берега р. Москва, площадью около 148 га, околнуренный автомагистралями и проспектом с интенсивным движением [8, 18]. На стадии разработки проекта обустройства ООПТ [19] на территории Воробьевых гор выделялись следующие типы растительности: 1) высоковозрастной широколиственный лес (липа, вязь, клен, дуб, ясень); 2) средневозрастные кленарники снытьевые и пролестниковые; 3) средневозрастной березняк как искусственного, так и природного происхождения, локализованный в центральной части заказника; 4) разновозрастной осинник самосевом в районе Андреевского монастыря (после планировки рельефа в конце 1950-х гг.); 5) черноольшанник, произрастающий в местах разгрузки грунтовых вод, где наблюдается постоянное увлажнение корнеобитаемого слоя; в его подлеске встречается черемуха, кустарниковые ивы; 6) ивняк-раkitник, фиксируемый

в переувлажненных межползневых ложбинах; 7) самосевный кленарник из клена ясенелистного, имеющий ограниченное распространение выше Андреевского монастыря на склоне и занимающий наряду с сорной травой антропогенно-трансформированные участки; 8) закустаренная луговина – на момент проектирования заказника была распространена только на террасе в центральной части Воробьевых гор; 9) насаждения паркового типа, отличающиеся большим разнообразием, сформированные с середины 1950-х гг. вдоль ул. Косыгина, Воробьевского шоссе, Андреевской и Воробьевской набережных [19].

Регулярно выполняемое вдоль дорожной и рекреационной “тропиночной” сети компенсационное озеленение частично решает проблему восстановления почвенного и растительного покрова, но актуально более широко внедрять в практику наилучшие доступные зеленые технологии для минимизации негативных антропогенных и природных факторов влияния на биотические компоненты геосистем.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИИ “ВОРОБЬЕВЫХ ГОР”

Работа осуществлялась поэтапно и включала комплекс исследований: обработка массивов данных, маршрутные, камеральные, аналитические исследования, экогеологическая систематика полученных данных на базе метода эколого-геологического картографирования. Изучение почв (эдафотоп) и фитоценозов проводилось синхронно с учетом исторически сложившихся функциональных зон, информация о которых была систематизирована на основе работы с архивными материалами [2, 3, 5].

В процессе полевых маршрутов осуществлялась фотофиксация интенсивности проявления геодинамических процессов; выполнялись эколого-геофизические исследования гамма-фона, вибрационного поля вблизи границ и на территории заказника [2, 3, 5, 16]. Измерения производились на базе оборудования геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова: виброметром портативным ОКТАВА-110А – шумомером 1 класса точности по ГОСТ 17187, ГОСТ Р 53188.1 (МЭК 61672–1), и виброметром по ГОСТ ИСО 8041 (встроенные октавные и 1/3-октавные фильтры прибора удовлетворяют 1-му классу по ГОСТ 17168 и МЭК 61260).

Определение валовых форм тяжелых металлов в пробах почвы и растительности проводилось на рентгенофлуоресцентном спектрометре “СПЕКТРОСКАН-МАХ-GV”, согласно методике, разработанной ООО НПО “Спектрон” и аттестованной в соответствии с ГОСТ 8.563–96 [25].

В ходе гидрогеохимического этапа полевых работ был осуществлен замер дебита родников

объемным способом; согласно [11], определяли температуру, pH и удельную электропроводность с использованием портативных pH-метра PH–200 и кондуктометра СОМ–100, соответственно. Для исследования анионов воду отбирали в емкости из полиэтилена “под крышку”. С целью определения концентрации главных катионов и микроэлементов пробы фильтровали через стерильные насадки из ацетата целлюлозы с диаметром пор 0.45 мкм в пробирки из полипропилена вместимостью 15 мл и подкисляли фильтрат HNO_3 (ос.ч.) до $\text{pH} < 2$.

Содержание главных катионов (Ca, Mg, Na, K) и микроэлементов (Fe, Mn, Sr, Ba, Al, Ti, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Mo) анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) и на масс-спектрометре ELAN–6100. Количество Cl^- и HCO_3^- оценивали методами объемного титрования; NO_3^- и NH_4^+ – на базе потенциометрии; SO_4^{2-} – методом рентгенофлуоресцентного анализа с предконцентрированием по методу высушенной капли [15].

Экологическая интерпретация полученных междисциплинарных данных осуществлялась на основе современной критериальной базы и новых направлений в геоэкологии [6, 13, 23, 24, 26]. Класс состояния эколого-ресурсных условий определялся на основе массива полученных данных о состоянии абиотических и биотических компонентов геосистем на базе принципа доминанты наихудшего показателя.

ЭКОЛОГО-РЕСУРСНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ООПТ “ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ”

До начала рекреационного освоения территории ООПТ почвенный покров (эдафотоп) был представлен преимущественно зональными дерновыми и дерново-подзолистыми почвами. Однако в нагорной части заказника, на запечатанных под сооружениями территориях, вдоль набережной и на ряде смежных участков естественный почвенный слой был трансформирован. В настоящее время на территории заказника “Воробьевы горы” преобладают естественно-антропогенные и антропогенные почвы, составляющие в совокупности ~90% площади. Их эколого-ресурсные параметры по агрохимическим параметрам ближе к характеристикам урбаноземов, чем к зональным почвам, что говорит о высоком уровне снижения ресурсного потенциала района под влиянием рекреантов и мегаполиса [32].

Вследствие механического воздействия в пределах велотрековой площадки и зон отдыха возможность естественного восстановления почв блокируется из-за превышения рекреационной нагрузки. В результате наиболее ценные естественные почвенные ресурсы сохранились преимущественно в межползневых ложбинах.

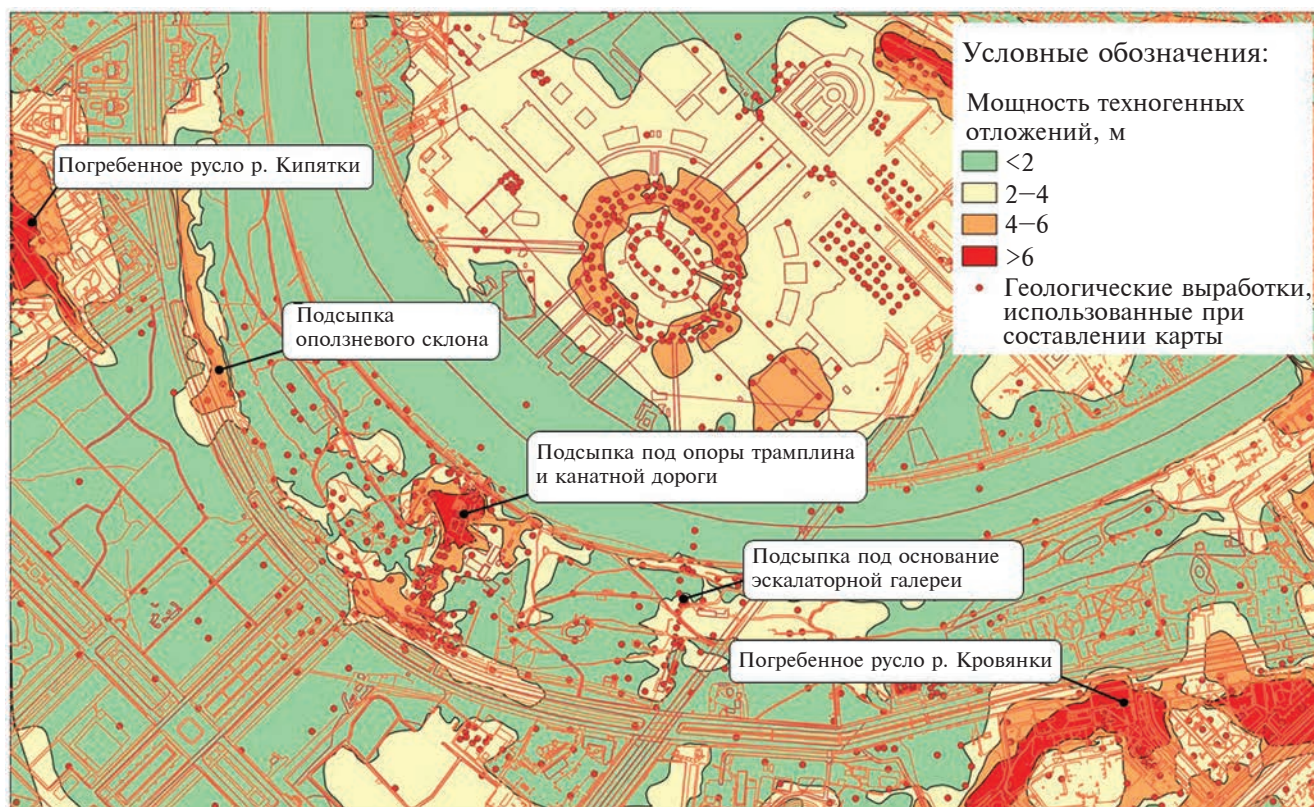


Рис. 2. Карта-схема мощности техногенных отложений территории Воробьевых гор и их окрестностей (с указанием участков существенной трансформации ресурса геологического пространства по данным ГБУ «Мосгоргеотрест» [10]).

В среднем территория Воробьевых гор относится к зоне умеренной деградации почвенных ресурсов, со средним смывом с поверхности 0.7 т/га/год [23].

Исследуемая территория относительно недавно получила статус природного заказника, поэтому экологический след от предшествующих видов хозяйственной деятельности фиксируется не только по латерали, но и по вертикали существенно глубже зоны ризосферы. Об этом свидетельствует разработанная карта-схема (рис. 2) мощностей техногенных отложений территории Воробьевых гор и их окрестностей с маркированием участков трансформации рельефа земной поверхности [10].

При построении карты-схемы были систематизированы подборка геологических выработок и результаты топографической съемки за период с начала 1930-х гг. до нашего времени. В частности, анализируемая территория была существенно изменена при строительстве горнолыжного трамплина, канатной дороги, эскалаторной галереи и других сооружений, а также при укреплении бровки оползневого склона, а на прилегающей территории — при засыпке долин малых рек Кровянка и Кипятка.

Данную картину пространственной приуроченности массивов техногенных отложений

в районе ООПТ, полученную на основе анализа большого массива данных, важно учитывать при дальнейшем планировании функциональной организации территории [22] в комплексе с учетом интенсивности экзогенных геологических процессов в местах их природной локализации.

ЭКОЛОГО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ ООПТ «ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ»

Согласно многолетним наблюдениям, территория Воробьевых гор поражена оползнями более чем на 30%, что дает основание классифицировать состояние эколого-геологических условий по абиотическому фактору как катастрофическое. Однако наши исследования (2007–2022 гг.) показали, что на примере Воробьевых гор четко фиксируется инверсия между классами эколого-геологических условий и состоянием биотической компоненты геосистем, так как самые ценные дендрологические объекты приурочены к днищам оврагов и районам стабилизировавшихся оползневых массивов [2–4, 13, 16, 23].

Современная антропогенная нагрузка может являться активизатором геодинамических процессов, например, в местах неконтролируемой



Рис. 3. Разгрузка подземных вод (выделено красным) у подножия склона Воробьевых гор.

разгрузки подземных вод (рис. 3), либо в пределах территорий искусственного складирования снежных масс, которые в период снеготаяния приводят к избыточному обводнению тыловых швов оползневых террас, что способствует снижению несущей способности корневой системы деревьев и т.д.

Необходимо отметить и значительную роль в формировании эколого-геодинамических условий района делювиального (плоскостного) смыва, развитого на различных гипсометрических уровнях и осложняющего процесс задернования склонов, ослабление корневых систем деревьев, что инициирует формирование эрозионных ниш, преимущественно на склонах с крутизной более 20°.

Овражная эрозия – широко-развитый экзогенный процесс, формирующий линейно-вытянутые отрицательные формы рельефа (овраги, балки и т.д.). В зависимости от дробности деления выделяются участки со слабо и средне деградированным состоянием по развитию овражной эрозии. В целом территория заказника оценивается как средне деградированная. Заболачивание территории характерно для пониженных частей склона в зоне выхода подземных вод.

В настоящее время на территории заказника применяются инновационные технологии, актуальные для стабилизации склоновых процессов,

оптимизирующие вектор развития рекреационного кластера Воробьевых гор (рис. 4). Инновации в строительной индустрии и агротехнологии позволили в значительной мере локализовать природные процессы и восстановить ресурсный потенциал почвенного покрова по обеспеченности макро- и микробиогенными элементами, создать комфортные условия для зон рекреации, разработать сеть экологических троп, сделав более доступной территорию ООПТ для жителей и гостей мегаполиса с различным уровнем физической активности, в том числе и природные уникальные родники, озера и т.д., являющиеся рекреационными ресурсами и объектами исследований для специалистов ГПБУ “Мосэкомониторинг” и других различных научных школ.

Эколого-гидрогеохимические особенности родников

За качеством природных ресурсов родниковых вод мегаполиса осуществляет регулярные наблюдения служба ГПБУ “Мосэкомониторинг” (с периодичностью раз в месяц с апреля по сентябрь) по ряду показателей: SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , HCO_3^- , Fe (общ), Mn (общ), общая жесткость, перманганатная окисляемость, pH, минерализация, а также температура и дебит [29].



Рис. 4. Историческая визуальная ретроспектива эскалаторной галереи и древостоя на территории Воробьевых гор: трансформация галереи [9] (а) и фитоценозов (б) под влиянием геодинамических процессов; в – реконструкция эскалаторной галереи 23.12.2022 г. – оптимизация рекреационного кластера (Фото Т.А. Барабошкиной, 2023 г.).

Систематизация гидрогеохимических данных за 2014–2020 гг. (табл. 1, рис. 5) показала, что по катионному составу воды варьируют от кальциевых до магниевых-кальциевых, по анионному составу доминируют хлоридно-гидрокарбонатные воды, реже фиксируются гидрокарбонатные (14 и 16 пункт наблюдения, далее п.н.). Кроме того, на период опробования для вод родников 14 и 16 было характерно повышенное содержание Fe. Резких колебаний величин температуры воды родников не зафиксировано (7–10°C). Дебиты источников отличаются незначительно: п.н. 12,

13, 16 – 0.1–0.3 л/с, п.н. 77, 78 – 0.4–1 л/с; п.н. 14 и 169 – 1–2 л/с [29].

В августе 2022 г. авторами в рамках подготовки научно-учебных задач было проведено опробование пяти каптированных родников на территории заказника (№№ 12, 14, 16, 77, 78) (рис. 5, 6). Содержание макрокомпонентов по результатам исследований авторов близко к опубликованным данным ГПБУ «Мосэкомониторинг» (в пределах коэффициентов вариации). Содержание Sr, Ba, Ti, Co, Cu, Zn, Pb, Mo в воде родников в 10 и более раз ниже ПДК питьевых вод нецентрализованного

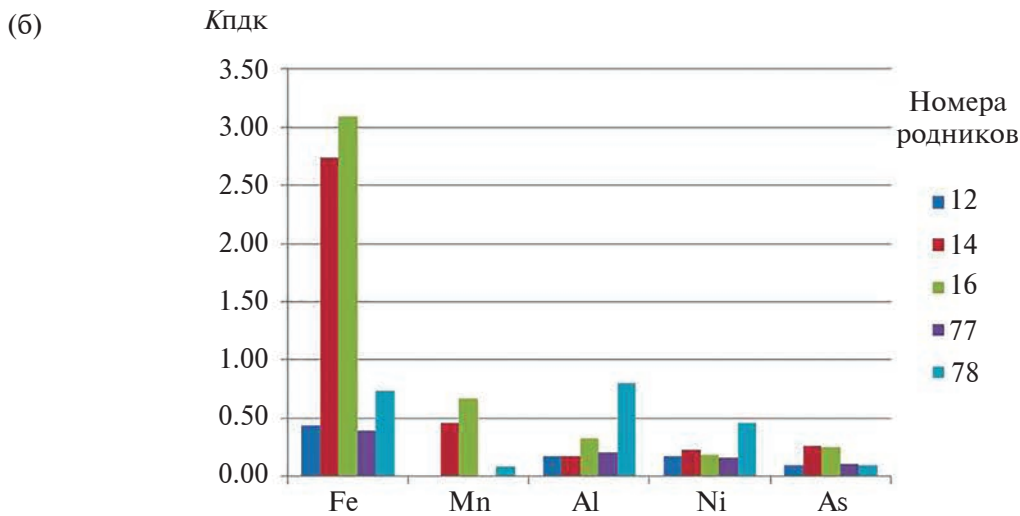
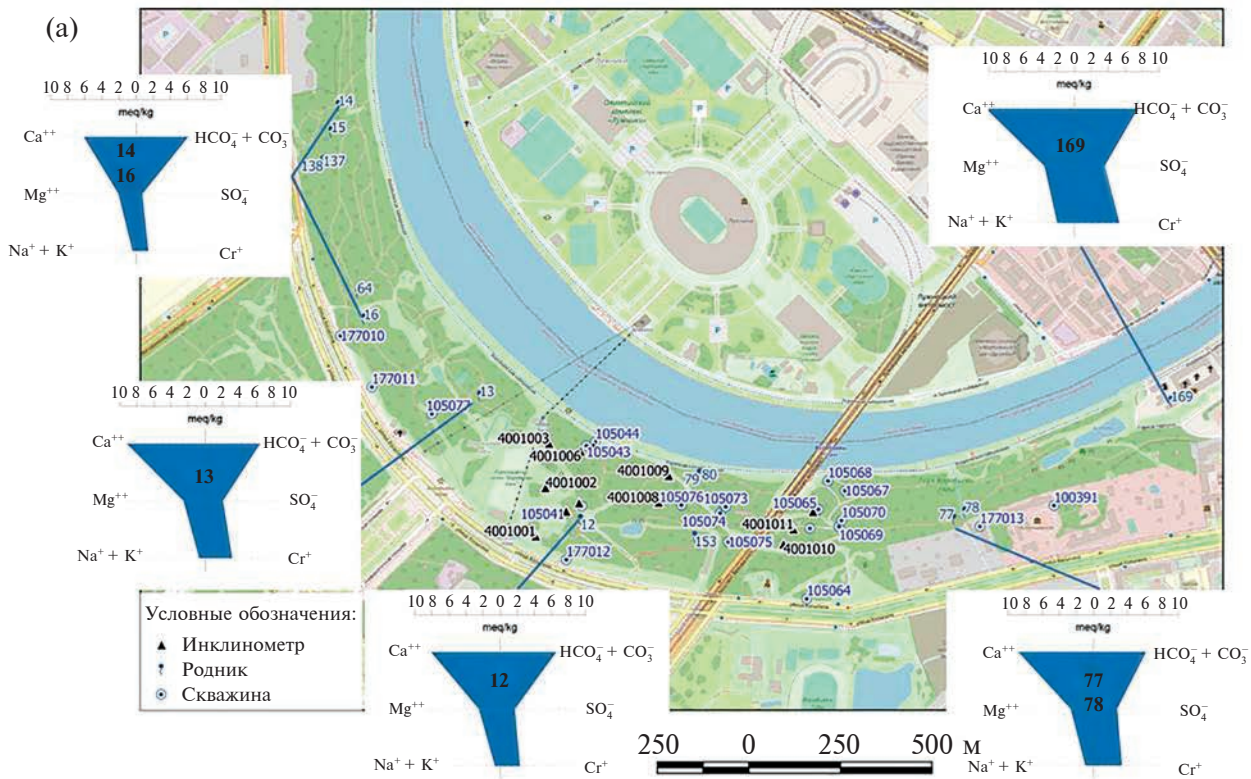


Рис. 5. Интегральная схема местоположения пунктов мониторинга по данным ГПБУ “Мосэкомониторинг” и диаграммы Стиффа [31] макрокомпонентного состава вод родников (а); содержание микроэлементов (в значениях Кпдк) в воде родников, изученных в 2022 г. (б).

водоснабжения [24], Mn, Al, Ni, As – до 0.8 ПДК (см. рис. 5). Необходимо отметить, что концентрации железа в п.н. 14 и 16 сохраняют свой тренд (в среднем Кпдк = 3). Кроме того, по результатам многолетнего мониторинга содержание железа в водных пробах из каждого отдельного родника характеризуется высокими коэффициентами вариации (до 84%, см. табл. 1), что может быть связано как с метастабильной формой нахождения элемента в воде, так и с состоянием труб каптажа. При длительном потреблении родниковых

вод с высокими концентрациями соединений железа возникает риск его накопления в суставах, печени, эндокринных железах и сердце, развития дисфункции центральной нервной системы. Ряды наблюдений (2012–2020 гг.) свидетельствуют о вариациях гидрохимического состава подземных вод, но лишь в отдельных источниках превышены величины предельно-допустимых концентраций [24] по содержанию железа (см. табл. 1).

В рамках решения научно-учебных задач по анализу “Эколого-геохимических особенностей

Таблица 1. Гидрогеохимические особенности ряда родников природного заказника Воробьевы горы

Показатель	Ед. изм.	ПДК	Номер родника и год опробования																				
			12		14		16		77		78		13		169								
			2014–2020	2022	2014–2020	2022	2014–2020	2022	2014–2020	2022	2014–2020	2022	2014–2020	2022	2014–2020	2022	2014–2020	2022					
рН	–		C	7.1	3	7.3	–	0.7	37	–	0.6	32	–	0.7	29	–	1.3	137	–	1.9	79	0.9	42
			V, %	7.1	3	7.3	–	0.7	37	–	0.6	32	–	0.7	29	–	1.3	137	–	1.9	79	0.9	42
ПМО	мгО/л	5	C	0.6	27	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			V, %	0.6	27	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ж	мг-экв/л	7	C	10.9	5	11.8	8.6	4	8.8	9.3	5	9.1	12.6	5	13.8	11.9	2	12.9	12.1	10	14	14	6
			V, %	10.9	5	11.8	8.6	4	8.8	9.3	5	9.1	12.6	5	13.8	11.9	2	12.9	12.1	10	14	14	6
M	мг/л	1500	C	777	7	885	620	9	701	671	7	704	899	6	1026	858	10	944	841	14	1086	8	8
			V, %	777	7	885	620	9	701	671	7	704	899	6	1026	858	10	944	841	14	1086	8	8
Ca ²⁺	мг/л	–	C	161	6	172	122	10	132	135	8	131	188	7	208	175	9	191	183	12	206	6	6
			V, %	161	6	172	122	10	132	135	8	131	188	7	208	175	9	191	183	12	206	6	6
Mg ²⁺	мг/л	–	C	30	14	38	25	12	26	26	11	30	34	6	40	32	8	40	31	11	42	9	9
			V, %	30	14	38	25	12	26	26	11	30	34	6	40	32	8	40	31	11	42	9	9
Na ⁺	мг/л	–	C	14	14	14	9	29	13	13	21	9	21	10	21	21	5	21	16	15	45	19	19
			V, %	14	14	14	9	29	13	13	21	9	21	10	21	10	21	5	21	16	15	45	19
K ⁺	мг/л	–	C	–	–	1.5	–	–	1.9	–	–	1.7	–	–	–	–	–	1.4	–	–	–	–	–
			V, %	–	–	1.5	–	–	1.9	–	–	–	1.7	–	–	–	–	–	1.4	–	–	–	–
NH ₄ ⁺	мг/л	1.5	C	–	–	0.9	–	–	0.9	–	–	0.7	–	–	–	–	–	0.7	–	–	–	–	–
			V, %	–	–	0.9	–	–	0.9	–	–	–	0.7	–	–	–	–	–	0.7	–	–	–	–
HCO ₃ ⁻	мг/л	–	C	397	10	429	368	11	422	390	8	417	388	13	431	372	10	415	387	17	449	12	12
			V, %	397	10	429	368	11	422	390	8	417	388	13	431	372	10	415	387	17	449	12	12
SO ₄ ²⁻	мг/л	500	C	81	23	113	32	50	45	45	37	31	134	37	149	132	35	110	98	23	169	36	36
			V, %	81	23	113	32	50	45	45	37	31	134	37	149	132	35	110	98	23	169	36	36
Cl ⁻	мг/л	350	C	81	17	101	49	41	52	55	23	81	126	12	162	117	10	153	110	24	186	11	11
			V, %	81	17	101	49	41	52	55	23	81	126	12	162	117	10	153	110	24	186	11	11
NO ₃ ⁻	мг/л	45	C	13	21	16	3	72	9	8	41	2	9	47	12	8	43	11	27	35	7	37	37
			V, %	13	21	16	3	72	9	8	41	2	9	47	12	8	43	11	27	35	7	37	37
NO ₂ ⁻	мг/л	3	C	0.04	53	–	0.04	53	–	0.03	50	–	0.03	45	–	0.02	63	–	0.02	35	0.04	69	69
			V, %	0.04	53	–	0.04	53	–	0.03	50	–	0.03	45	–	0.02	63	–	0.02	35	0.04	69	69
Mn	мг/л	0.1	C	0.001	30	0.001	0.062	51	0.067	0.049	27	0.046	<0.001	–	0.001	0.002	21	0.008	0.002	53	0.093	41	41
			V, %	0.001	30	0.001	0.062	51	0.067	0.049	27	0.046	<0.001	–	0.001	0.002	21	0.008	0.002	53	0.093	41	41
Fe	мг/л	0.3	C	0.098	54	0.130	0.851	84	0.926	0.529	54	0.821	0.103	34	0.117	0.079	11	0.220	0.096	47	0.269	70	70
			V, %	0.098	54	0.130	0.851	84	0.926	0.529	54	0.821	0.103	34	0.117	0.079	11	0.220	0.096	47	0.269	70	70

Примечание. ПМО – перманганатная окисляемость; Ж – общая жесткость; М – общая минерализация; V – коэффициент вариации; прочерк – данные отсутствуют; 2014–2020 гг. – усредненный состав на основании наблюдений ГПБУ “Мосэкомониторинг”; 2022 г. – данные авторов. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК питьевых вод нецентрализованного водоснабжения [24].

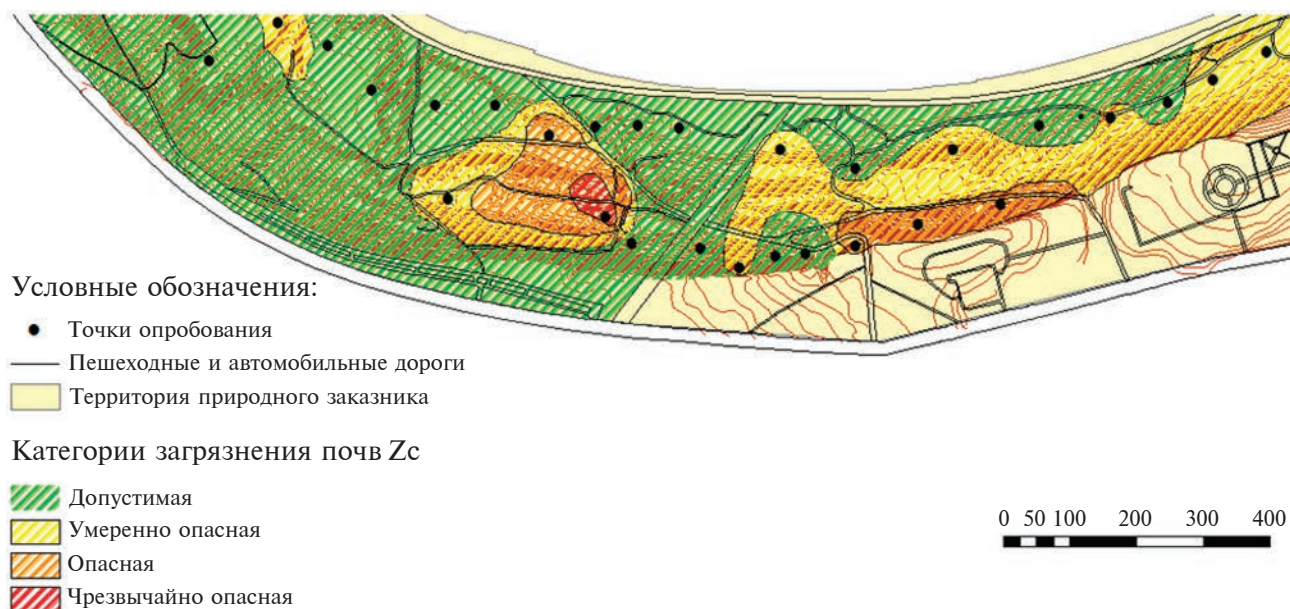


Рис. 6. Карта-схема районирования почвенного покрова (эдафотоп) территории Воробьевых гор по величине суммарного показателя (Z_c): категория допустимая – $Z_c < 16$; умеренно-опасная – $Z_c = 16-32$; опасная – $Z_c = 32-128$; чрезвычайно опасная – $Z_c > 128$.

территории Воробьевы Горы” получены предварительные данные по ряду параметров в почвах и растительности. Почвы по величине превышения предельно допустимых концентраций (Кпдк) и ориентировочно допустимых концентраций (Кодк) имеют отдельные локальные максимумы, приуроченные к понижениям с застойным водным режимом, либо в зоне влияния старых площадок несанкционированных пикников.

Эколого-геохимические особенности почвенных ресурсов

Анализ концентрации поллютантов в почве по профилям, пройденным перпендикулярно автотрассе, показали мозаичный характер их распределения в пределах вариации средних значений, характерных для территории заказника, что, вероятно, обусловлено регулярной ротацией газонных почв в весенне-осенний период. Сопоставление полученных данных с типичными для региона фоновыми концентрациями выявило тенденцию аналогичную, пространственной изменчивости Кпдк.

Анализ уровня загрязнения почв по величине суммарного показателя загрязнения (Z_c) показал, что большинство изученных проб с территории заказника относится к допустимой категории загрязнения. За исключением локального аномального участка (100 м к западу от нижней станции метрополитена) в районе насыпного техногенного массива с повышенной влажностью ($Z_c = 134$), образованного на этапе реконструкции станции метрополитена. Интегральная оценка выполнена

на базе принципа доминанты наихудшего показателя по итогам анализа данных по абиотическим (почвы) и биотическим компонентам (листья клена) геосистем.

Большинство аналитических исследований почвенных проб имеют допустимый уровень загрязнения ($Z_c < 16$). Умеренно-опасная категория загрязнения диагностирована в пробах, приуроченных к перекрестку ул. Косыгина и Проспекта Вернадского. Опасный и умеренно-опасный уровень загрязнения зафиксирован в районе техногенно-переотложенного насыпного массива, в зоне влияния автодорожного моста (см. рис. 6).

Анализ уровня загрязнения фитоценозов по величине суммарного показателя загрязнения показал, что по уровню Z_c для изученных проб листьев клена определен допустимый уровень загрязнения, за исключением точек опробования, расположенных у границ заказника, в местах его приоткрытия к Проспекту Вернадского (на нижней границе умеренно опасной категории).

Эколого-геофизические особенности территории ООПТ

Изучение эколого-геофизических особенностей территории показало, что мощность эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения и значения эффективной удельной активности нуклидов в грунте на исследуемом участке не превышают значений, установленных [12]. Вариации гамма-излучения на территории Воробьевых гор составляет 0.05–0.12 мкЗв/час, что является

нормальным уровнем мощности эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения в равнинных районах и не превышает фоновых значений для Москвы (0.09–0.14 мкЗв/час).

Значение плотности потока радона в изученных эксплуатируемых помещениях не превышает нормируемый предел для производственных зданий и фоновые для Москвы значения. Максимальные величины уровня вибрации и шума (более 70 дБ) фиксируются в месте сочленения Проспекта Вернадского и метрооста и находятся в непосредственной близости от эскалаторной галереи. По уровню звукового давления на территорию заказника зафиксированы вариации от 35 до 50 и более дБ, превышая в дневные часы уровень комфорта для орнитофауны и рекреантов.

Недоучет в первоначальной конструкции галереи дополнительного вибрационного воздействия в синхронизации с природными процессами привело в конце 1980-х гг. к ее деформации, в результате на десятилетия была нарушена комфортность посещения жителями рекреации Воробьевых гор (см. рис. 4). На основе новых технологий XXI в. их удалось минимизировать.

Однако на современном этапе анализа эколого-ресурсного потенциала важно помнить, что избыточные вибрационные и акустические аномалии влияют на способность воспроизводства у биоты, например, у хищных птиц (на территории заказника наиболее подвержена шумовому воздействию популяция сов).

При планировании светового освещения проектировщики ориентировались на визуальную привлекательность территории для рекреантов. И добились прекрасного видеоэффекта с метрооста, смотровой площадки и других объектов городской инфраструктуры (см. рис. 1).

Как наглядно видно (см. рис. 1в) для орнитофауны, а также спортсменов, совершающих вечерние тренировки, эффект не столь однозначен. Орнитофауна оказывается погруженной в избыточное освещение в пределах лесных насаждений, что приводит к дестабилизации их биоритмов. В работе Л.Е. Лукьянова, Т.М. Красовской [17] проведено районирование центральной части территории Воробьевых гор по уровню превышения освещенности фоновых характеристик. Рационально реализовать дополнительные исследования и скорректировать схему освещений с учетом статуса границ природного заказника “Воробьевы горы”.

ВЫВОДЫ

Отличительной особенностью особо-охраняемой природной территории “Воробьевы горы” являются высокая степень изученности её эколого-ресурсного потенциала, а также наличие

массива междисциплинарных данных, что позволяет совершенствовать модели устойчивого развития зеленого пояса мегаполиса на базе наилучших доступных технологий в сфере реализации их рекреационных, средозащитных, санитарных и эколого-просветительских функций.

Наибольшее биоразнообразие на территории ООПТ зафиксировано в районах развития древних оползней, столетиями лимитировавших доступность склонов Воробьевых (Ленинских) гор для активного хозяйственного освоения.

Выполненный анализ большого массива геологических данных для решения задачи диагностики местоположения участков с техногенными грунтами позволил разработать модель пространственного распространения массивов техногенных отложений с наиболее уязвимыми компонентами геосистем, что важно учитывать в проектах комплексного благоустройства долины р. Москва.

Техногенные изменения в районе Лужнецкой набережной маркируются и по эколого-геохимическим аномалиям в компонентах геосистем (педосфере, фитоценозах), преимущественно локализуясь в зоне воздействия городских автомагистралей и автопотока, пересекающего эстакаду метрооста. Целесообразно рассмотреть вопрос об экранировании автомобильной части метрооста, как источника интенсивных техногенных выбросов на смежную территорию природного заказника.

Эколого-просветительская функция заказника успешно реализуется для всех ступеней образования. Разработка эколого-геологических задач с учетом данных экологического мониторинга позволяет унифицировать процесс подготовки специалистов в высшей школе и в сфере реализации задач устойчивого развития городских геосистем к 2030 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Айвазовский И.К.* Вид на Москву с Воробьевых гор. 1848 г. // Айвазовский Иван Константинович. Сайт о жизни и творчестве художника [Электронный ресурс] http://see-art.ru/art_215/ (дата обращения 27.08.2016).
2. *Барабошкина Т.А., Кичаева А.П., Сеземан В.И.* Эколого-геологические исследования центральной части природного заказника Воробьевы горы // Матер. междунар. научно-практ. конф. “Экологическая геология: научно-практические, медицинские и экономико-правовые аспекты”. Воронеж: ВГУ, 2009. С. 125–127.
3. *Барабошкина Т.А., Самарин Е.Н., Белютина В.С.* Геоэкологические особенности Воробьевых гор (Москва, Россия) // Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24–25 марта 2016.). Сергеевские чтения. Вып. 18. М.: РУДН, 2016. С. 244–248.
4. *Барыкина О.С., Зеркаль О.В., Самарин Е.Н., Гвоздева И.П.* К вопросу о развитии оползневых процессов на Воробьевых горах (г. Москва) // В сб.

- Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: матер. научно-практ. конф. 2017. С. 111–117.
5. *Белютина В.С., Самарин Е.Н., Барабошкина Т.А.* Эколого-геологические условия природного заказника Воробьевы Горы (город Москва) // Школа экологической геологии и рационального недропользования. СПб.: ИЦ СПбГУ. 2014. С. 131–133.
 6. *Бурова В.Н.* Основные принципы оценки риска урбанизированных территорий // Геоэкология. 2020. № 5. С. 78–88.
 7. *Варава К. В.* Некоторые особенности эколого-геохимического мониторинга рекреационных зон Москвы // Разведка и охрана недр. № 7. 2012. С. 17–22.
 8. Воробьевы горы. Спортивно-развлекательный комплекс. [Электронный ресурс] <https://srkvg.ru/srk-vorobevy-gory/proekt-razvitiya> (дата обращения 28.06.2023).
 9. Доклад о состоянии окружающей среды в г. Москве в 2011 г. М.: Департамент природопользования и ООС / Под ред. А.О. Кульбачевского. 2012. 153 с. <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/63268220/>
 10. *Жидков Р.Ю., Абакумова Н.В., Рекун В.С.* Применение комплексного ретроспективного анализа при определении конфигурации массивов техногенных грунтов на примере г. Москвы // Инженерная геология. № 1. 2023. С. 12–17.
 11. *Завершинский А.Н., Можаров А. В., Рязанов А. В.* Рекомендации по изучению, охране и благоустройству родников: учебно-методическое пособие. Тамбов: ТГУ им. Г.Р. Державина. 2020. 38 с.
 12. *Карпова Е.А., Самарин Е.Н., Барабошкина Т.А.* Оценка радиационного фона и загрязнения почв Центральной части природного заказника Воробьевы горы // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. тр. Вып. 13. М.: Изд-во РУДН, 2011. С. 84–90.
 13. *Косинова И.И., Барабошкина Т.А.* Практикум к учебной полевой практике по экологической геологии. Воронеж: Воронежский государственный университет. 2006. 64 с.
 14. *Кюнтцель В.В.* О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1965. XL (8), С. 93–100.
 15. *Лубкова Т.Н., Липатникова О.А., Филатова О.Р., Балыкова И.В.* Рентгенофлуоресцентный анализ сульфат-иона в водных растворах по методу высушенной капли с использованием портативного спектрометра // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 2. С. 59–67.
 16. *Лукашов А.А.* Оползни Воробьевых гор // Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты: VI Щукинские чтения: труды. М.: Географический факультет МГУ. 2010. С. 166–168.
 17. *Лукьянов Л.Е., Красовская Т.М.* Влияние светового загрязнения на местообитание птиц на территории природного заказника “Воробьевы Горы” // Проблемы региональной экологии. 2022. №1. С. 100–107.
 18. О мерах по развитию территорий Природного комплекса Москвы. Постановление N 564-ПП 21 июля 1998 г. М.: Правительство Москвы. [Электронный ресурс] <https://www.mos.ru/authority/documents/doc/28106220/> (дата обращения 20.07.2023).
 19. *Омельяненко Г.Б., Гухман Е.В., Смольянинов Е.О., Романенко Л.Н.* ООПТ – природный заказник “Воробьевы Горы”. М.: Москомархитектура, ГУП НИИП ИГП, 2004. 125 с.
 20. *Парецкая М.Н.* Зависимость морфологии оползней выдавливания Подмосковья от прочности юрских глин // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1975. Вып. 81. С. 94–97.
 21. Парк Горького. [Электронный ресурс] <http://www.park-gorkogo.com/about/vorobyovy-gory/history-of-vorobyovy-gory/> (дата обращения 28.12.2014)
 22. Развитие территории спортивного комплекса Воробьевы горы. [Электронный ресурс] <https://ano-sport.ru/project/30-razvitiie-territorii-sportivnogo-kompleksa-vorobevy-gory#gallery-2512928294-4> (дата обращения 25.01.2023).
 23. *Самсонова С.Ю., Белютина В.С., Барабошкина Т.А., Самарин Е.Н., Огородникова Е.Н.* Эколого-геоморфологический анализ в обосновании управления городскими особо-охраняемыми природными территориями // Вестник РУДН. Серия: “Экология и безопасность жизнедеятельности”. 2013. № 2. С. 93–99.
 24. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296). [Электронный ресурс] <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 22.01.2023).
 25. Свидетельство об аттестации МВИ №2420/69–2004. СПб, М. 2004. 4 с.
 26. *Трофимов В.Т., Барабошкина Т.А.* Программа дисциплины “Экологическая геология техногенно-осваиваемых территорий (ТОТ)” // Инновационные магистерские программы геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. М.: Изд-во. Московского университета, 2007. С. 199–207.
 27. *Трофимов В.Т., Королёв В.А., Куриленко В.В., Косинова И.И.* Учебные полевые практики студентов по экологической геологии // Инженерные изыскания. 2011. № 4. С. 32–48.
 28. *Школин А.А., Маленкина С.Ю.* Коренные отложения и аммониты нижеволжского подъяруса (верхняя юра) в Москве и Подмосковье: новое открытие для изученного региона // Prehistoric. Палеонтологическое наследие: изучение и сохранение. М.: Медиагранд, 2015. С. 89–94.
 29. Экологическая ситуация города Москвы. Мосэкомониторинг [Электронный ресурс] <https://mosecom.mos.ru/> (дата обращения 15.09.2021).
 30. *Barykina O.S., Zerkal O.V., Samarina E.N., Gvozdeva I.P.* The History of Slope Evolution – Primary Cause of its Modern Instability (by Example of the “Vorobyovy Gory” Landslide // Natural Hazards and Risk Research in Russia. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering, Springer Cham, 2019. P. 1000–1007.
 31. *Stiff H.A.* The interpretation of chemical water analysis by means of patterns // J. Petrol. Technology. 1951. Vol. 3/ N 10. P. 15–17.
 32. *Tishkina E.V., Paramonova T.A., Krasnov S.F., Tolstikhin D.O.* Soil cover structure and estimation of soil pollution by the main ecotoxicants in the Vorob’evy gory nature // Moscow University Soil Science Bulletin. 2010. Vol. 65. N 1. P. 39–45.

RESOURCE POTENTIAL OF VOROB'EVY GORY GEOSYSTEMS: HISTORY, STUDY, AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

T. A. Baraboshkina^{a,#}, E. N. Samarin^{a,#}, I. V. Averin^{b,##}, R. Yu. Zhidkov^{c,###}, N. N. Rakitina^{c,###},
I. A. Rod'kina^{a,#}, V. S. Rutskina^{d,####}, T. N. Lubkova^{a,#}, O. A. Lipatnikova^{1,*}

^aLomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119234 Russia

^bEngineering Geology LLC, ul. Yartsevskaya, 16, Moscow, 121351 Russia

^cMoscow Trust of Geological, Geophysical and Cartographic Works, ul. Zorge, 1, Moscow, 123308 Russia

^dMedbridge LLC, ul. 5-ya Magistral'naya, 20, Moscow, 123007 Russia

[#]E-mail: ecolab@mail.ru

^{##}E-mail: i.averin@mail.ru

^{###}E-mail: rzhidkov@gmail.com

^{####}E-mail: geovera@bk.ru

The article based on the methodology of interdisciplinary research solves the problems of retrospective analysis of the resource potential dynamics of geosystem components in the natural reserve located within the boundaries of the largest megacity of Eurasia to diversify the resource potential of the ecological-educational function of its territory. The unique experience of stable functioning of recreational territory is systematized synchronously with socio-economic development of Moscow urban industrial agglomeration based on complex studies. Additionally, some parts of its territory were studied in order to actualize scientific and educational tasks of higher school. The study is based on systematic approach to clarify the ecological state of the components of the environment. Local areas of different vector dynamics of geosystems of different genesis were identified. The role of natural and natural-anthropogenic factors (geological-geomorphological, ecological-geochemical, geodynamic, geophysical, anthropogenic, socio-economic) in the formation of geo-ecological features of the recreational potential of the conservation area of the urban environment is differentiated. The dynamics of the resource potential of the recreational cluster of the megacity occurs synchronously with the growth of the urban population of the urban-industrial complex and depends on the totality of socio-economic, cultural-historical, geo-ecological conditions and the synergetic vector of their interaction. The interdisciplinary approach based on the processing of databases, field observations and laboratory studies allowed the authors to improve the methodology of setting scientific and educational tasks within the framework of the implementation of the ecological-educational function of protected areas. Specially protected natural territories of megacity contribute significantly to the achievement of goals of stable urban development, preservation of biodiversity of territories and recreation areas, predetermining the creation of a comfortable environment for the inhabitants of large cities, contributing to the minimization of health risks for different gender groups of the population.

Keywords: *specially protected natural territories, recreation, sustainable development of megacities, ecological and educational function, urban and industrial agglomeration*

REFERENCES

1. Aivazovskii, I.K. [View of Moscow from Vorob'evy Gory. 1848]. Available at: http://see-art.ru/art_215/ (accessed 27.08.2016) (in Russian)
2. Baraboshkina, T.A., Kichaeva, A.P., Sezeman, V.I. [Ecological and geological studies of the central part of the Vorob'evy Gory Nature Reserve]. In: [Proc. Intern. Sci. and Pract. Conference. Ecological Geology: scientific, practical, medical and economic-legal aspects]. Voronezh: Voronezh State University, 2009, pp. 125–127. (in Russian)
3. Baraboshkina, T.A., Samarin, E.N., Belyutina, V.S. [Geological features of the Vorobyovy Gory (Moscow, Russia)]. In: [Sergeev Readings. Engineering geology and geocology. Fundamental problems and applied tasks]. Issue.18, Moscow, RUDN Publ., 2016, pp. 244–248. (in Russian)
4. Barykina, O.S., Zerkal', O.V., Samarin, E.N., Gvozdeva, I.P. [About the development of landslides on the Vorob'evy Gory (Moscow)]. In: [Proc. of Sci. and Pract. Conference "Engineering and geological problems of our time and methods of their solution"]. Moscow, 2017, pp. 111–117. (in Russian)
5. Belyutina, V.S., Samarin, E.N., Baraboshkina, T.A. [Ecological and geological conditions of the Vorob'evy Gory Nature Reserve (Moscow)]. In: [School of Ecological Geology and Rational Subsoil Use]. St. Petersburg, SPbGU Publ., 2014, pp. 131–133. (in Russian)
6. Burova, V.N. [Basic principles of risk assessment in urbanized territories]. *Geokologiya*, 2020, no. 5, pp. 78–88. (in Russian)
7. Varava, K.V. [Some features of ecological and geochemical monitoring of recreational zones in Moscow]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no. 7, pp. 17–22. (in Russian)
8. [Vorob'evy Gory. Sports and entertainment complex]. Available at: <https://srkvg.ru/srk-vorobevy-gory/proekt-razvitiya> (accessed 28.06.2023). (in Russian)
9. [Report on the state of the environment in Moscow in 2011]. A.O. Kul'bachevskii, Ed., Moscow, Department of nature management and environment protection. 2012, 153 p. (in Russian)
10. Zhidkov, R.Yu., Abakumova, N.V., Rekun, V.S. [Application of complex retrospective analysis in determining the configuration of technogenic soil massifs by the example of Moscow]. *Inzhenernaya geologiya*, 2023, no. 1, pp. 12–17. (in Russian)
11. Zavershinskii, A.N., Mozharov, A.V., Ryazanov, A.V. [Recommendations on the study, protection and improvement of springs: a manual]. Tambov, Derzhavin TGU, 2020, 38 p. (in Russian)
12. Karpova, E.A., Samarin, E.N., Baraboshkina, T.A. [Assessment of the radiation background and soil contamination

- in the Central part of the Vorob'evy Gory natural reserve]. In: [Actual problems of ecology and nature management: collection of articles]. Moscow, RUDN Publ., 2011, issue 13, pp. 84–90. (in Russian)
13. Kosinova, I.I., Baraboshkina, T.A. [Practicum to the educational field practice on ecological geology]. Voronezh, Voronezh State University Publ., 2006, 64 p. (in Russian)
 14. *Kyuntsel', V.V.* [About the age of deep landslides in Moscow and Moscow region associated with Jurassic clay deposits]. Byull. MOIP, Otd. geol., 1965, XL (8), pp. 93–100. (in Russian)
 15. Lubkova, T.N., Lipatnikova, O.A., Filatova, O.R., Balykova, I.V. [X-ray fluorescence analysis of sulfate-ion in aqueous solutions by the dried drop method using a portable spectrometer]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya*, 2022, no. 2, pp. 59–67. (in Russian)
 16. Lukashov, A.A. [Landslides on Vorob'evy hills]. In: [Geomorphologic processes and their applied aspects. Proc. All-Russian scientific conference devoted to the 255th anniversary of Moscow University and 125th anniversary of I. S. Shchukin]. Moscow, Moscow State University, Geographical Faculty, 2010, pp. 166–168. (in Russian)
 17. Luk'yanov, L.E., Krasovskaya, T.M. [Influence of light pollution on the habitat of birds within the nature reserve "Vorob'evy gory"]. *Problemy regional'noi ekologii*, 2022, no. 1, pp. 100–107. (in Russian)
 18. [On the measures to develop the territories of the Nature Complex of Moscow. Resolution N 564–PP July 21, 1998] Moscow: Moscow Government. Available at: <https://www.mos.ru/authority/documents/doc/28106220/> (accessed 20.07.2023). (in Russian)
 19. Omel'yanenko, G.B., Gukhman, E.V., Smol'yaninov, E.O., Romanenko, L.N. [Nature reserve "Vorob'evy gory"]. Moscow, Moskomarkhitektura, 2004, 125 p. (in Russian)
 20. Paretskaya, M.N. [Dependence of morphology of extrusion landslides in the Moscow region on the strength of Jurassic clay]. *Trudy VSEGINGEO*, 1975, issue 81, pp. 94–97 (in Russian)
 21. [Gor'ky Park]. Available at: <http://www.park-gorkogo.com/about/vorobyovy-gory/history-of-vorobyovy-gory/> (accessed 28.12.2014) (in Russian)
 22. [Development of the sports complex Vorobyovy Gory territory (2023)]. Available at: <https://ano-sport.ru/project/30-razvitie-territorii-sportivnogo-kompleksa-vorobyovy-gory#gallery-2512928294-4> (accessed 25.01.2023). (in Russian)
 23. Samsonova, S.Yu., Belyutina, V.S., Baraboshkina, T.A., Samarin, E.N., Ogorodnikova, E.N. [Ecological and geomorphologic analysis in justification of urban management of specially protected natural territories]. *Vestnik RUDN. Seriya: "Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti"*, 2013, no. 2, pp. 93–99. (in Russian)
 24. [SanPiN 1.2.3685–21. Hygienic norms and requirements to ensure the safety and (or) harmlessness for humans of environmental factors (Registered in the Ministry of Justice of Russia 29.01.2021 № 62296)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed: 22.01.2023). (in Russian)
 25. [Certificate of certification of MVI no. 2420/69–2004]. Moscow, 2004, 4 p. (in Russian)
 26. Trofimov, V.T., Baraboshkina, T.A. [Program of the discipline "Ecological Geology of Technogenically Developed Territories (TDT)"]. In: [Innovative Master's Programs of the Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University]. Moscow, MSU Publ., 2007, pp. 199–207. (in Russian)
 27. Trofimov, V.T., Korolev, V.A., Kurilenko, V.V., Kosinova, I.I. [Educational field practice of students on ecological geology]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2011, no. 4, pp. 32–48. (in Russian)
 28. Shkolin, A. A., Malenkina, S.Yu. [Bedrock and ammonites of the Lower Volga series (Upper Jurassic) in Moscow and the Moscow region: a new discovery for the studied region]. In: [Prehistoric. Paleontological Heritage: Study and Preservation]. Moscow: Mediagrand, 2015, pp. 89–94. (in Russian)
 29. [Ecological situation in Moscow. Mosecomonitoring]. Available at: <https://mosecom.mos.ru/> accessed: 15.09.2021). (in Russian)
 30. Barykina, O.S., Zerkal, O.V., Samarin, E.N., Gvozdeva, I.P. The History of slope evolution – primary cause of its modern instability (by the example of Vorob'evy Gory Landslide. In: Natural hazards and risk research in Russia. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering, Cham, Springer, 2019, pp. 1000–1007.
 31. Stiff, H.A. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *J. Petrol. Technology*, 1951, vol. 3, no. 10, pp. 15–17.
 32. Tishkina, E.V., Paramonova, T.A., Krasnov, S.F., Tolstikhin, D.O. Soil cover structure and estimation of soil pollution by the main ecotoxicants in the Vorob'evy Gory nature. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2010, vol. 65, no. 1, pp. 39–45.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

СЕЙСМИЧНОСТЬ МАРОККО
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 08.09.2023
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ “ЭКСТРЕМУМ”

© 2024 г. Н. И. Фролова^{1,*}, И. П. Габсатарова^{2,**}, С. П. Сущев^{3,***}, Н. С. Малаева¹

¹Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Федеральный исследовательский центр “Единая Геофизическая Служба РАН”
(ФИЦ ЕГС РАН), Ленина пр., 189, Обнинск, Калужская обл., 249035 Россия

³Московский государственный технический университет им. Баумана (МГТУ),
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

**E-mail: ira@gsras.ru

***E-mail: Sersan150@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

После доработки 23.11.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

В статье решается задача подбора уравнений затухания сейсмической интенсивности для территории Марокко и моделирования последствий сильного разрушительного землетрясения 8 сентября 2023 г. Актуальность исследования определяется необходимостью получения надежных оценок возможных потерь от землетрясений для принятия решения о реагировании и выборе стратегии поисково-спасательных работ с учетом наиболее пострадавших населенных пунктов. Целью исследования является калибровка модели затухания сейсмической интенсивности системы “Экстремум” для территории Марокко. Впервые для рассматриваемой территории выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы, для оперативной оценки возможных последствий сильных событий. Изучено влияние региональной матрицы повреждений на результаты моделирования возможного ущерба от землетрясения. Для оценки возможных последствий землетрясения 08.09.2023 г. применены методы имитационного компьютерного моделирования с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи. В статье приводятся предварительные результаты моделирования последствий землетрясения в Марокко, дается оценка сходимости расчетных и наблюдаемых интенсивностей для различных уравнений затухания интенсивности, полученных ранее для Марокко и сопредельных территорий в пределах Альпийско-Гималайского сейсмоактивного пояса.

Ключевые слова: оперативная оценка потерь, информационная система “Экстремум”, калибровка модели, макросейсмическое поле, сильное землетрясение, Марокко

DOI: 10.31857/S0869780924020036; EDN: DZWGLG

*Посвящается памяти Г.П. Горикова (1909–1984),
выдающегося специалиста в области геотектоники
и сейсмотектоники, основоположника нового направления
в науке – сейсмического районирования [2].*

ВВЕДЕНИЕ

Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс (АГСП) (Средиземноморско-Трансасиатский по [5]) чрезвычайно сейсмически активен в 2023 г. Начало было положено разрушительными Турецкими землетрясениями 06.02.2023 г. с $M_w = 7.8$ и 7.5 на Восточно-Анатолийском разломе, где

несколько веков не было столько мощного проявления сейсмичности с катастрофическими последствиями [3, 17]. В противоположных от Турецких очагов направлениях в АГСП произошли землетрясения с разрушительными эффектами: через 215 сут – на западе, в северо-западной части Африки 8 сентября 2023 г. с $M = 6.8$ (NEIC)

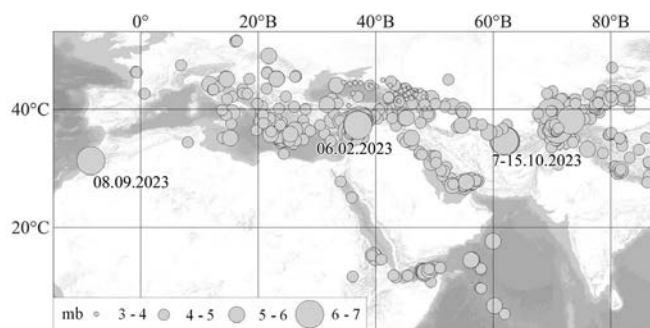


Рис. 1. Карта сейсмичности в Альпийско-Гималайском поясе, по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН (выборка сделана от эпицентра Турецкого землетрясения с радиусом 5500 км).

в Марокко, через 246 сут — на востоке, в Афганистане, в западной части страны серия землетрясений близкой магнитуды 7 октября 2023 г. (два толчка с разницей в 30 мин. по времени возникновения), 11 и 15 октября 2023 г. с $M = 6.3–6.4$ и глубинами в верхней части земной коры (оперативные данные ЕГС ФИЦ РАН) (рис. 1).

Можно высказать предположение о триггерном влиянии Турецких землетрясений 6 февраля на сейсмичность значительной части АГСП. Так называемым “деформационным” волнам, в том числе возникшим после сильного землетрясения, как одному из “триггерных” механизмов подвижности разломно-блоковой структуры континентальной литосферы и генерации сейсмической активности [5] уделяется большое внимание в работах плеяды советских и российских ученых. Довольно полное описание этих работ приводится в монографии С.И. Шермана, посвященной тектонофизической концепции сейсмического процесса и прогнозу землетрясений.

Предметом настоящей статьи является исследование сильнейшего Марокканского землетрясения 08.09.2023 г. с $M = 6.8$ [13] с целью возможной калибровки ГИС “Экстремум” для этого района.

Авторы этой работы задались целью создания “однородного по магнитуде каталога”. Предполагается провести исследование коэффициентов макросейсмического уравнения для этого района. Для этого создана выборка по различным источникам [7, 10, 12] для Марокко и сопредельных территорий. Анализ результатов моделирования последствий и сравнение с наблюдаемыми данными по интенсивности позволяет сделать вывод о хорошей сходимости между наблюдаемыми и расчетными интенсивностями I_i при использовании уравнений для зоны Верхнего и Среднего Атласа [10], для Алжира и Атласских гор [7] и для территории Турции [12]. Сравнение полученных оценок ущерба для населенных пунктов Adassil (Адасиль) и Targua (Тарга), расположенных в сильно

пострадавшей провинции Chichaoua (Чичауа), с космическими снимками показывает удовлетворительную сходимость в оценках расчетных и наблюдаемых средних степеней повреждений застройки населенных пунктов.

СЕЙСМИЧНОСТЬ АФРИКАНСКОГО КОНТИНЕНТА

Долгое время огромный Африканский континент считался асейсмичным, вплоть до начала XX в. были известны лишь незначительные проявления сейсмичности в районе гор Атласа, Абиссинского нагорья, в районе о. Мадагаскар и локально в некоторых других территориях на юге и востоке континента. Известно, что исследованию сейсмичности этого континента уделяли внимание, кроме зарубежных, и советские ученые. Среди них особое место занимает работа “О сейсмичности Африки” выдающего ученого геолога-тектониста-сейсмолога Г.П. Горшкова [1, 14, 15]. Как пишет сам автор, эта работа была выполнена по инициативе и заданию Департамента естественных наук ЮНЕСКО на кафедре динамической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова в содружестве с Институтом физики Земли АН СССР и Советом по сейсмологии АН СССР. Г.П. Горшков посчитал своим долгом широко обсудить созданный труд с советскими и зарубежными коллегами, среди которых были, например, Ч. Рихтер и Б. Гутенберг, которые в 1949 и 1954 г. в монографии о сейсмичности Земли [16] опубликовали каталог землетрясений мира, в том числе и Африки [1]. Данные этого каталога послужили Г.П. Горшкову основой для написания монографии “О сейсмичности Африки”. Были составлены списки землетрясений различных сеймотектонических зон Африки, построен ряд карт, характеризующих распределение сейсмичности и сеймотектонические зоны (рис. 2 и 3).

Установлено, что большую часть территории Африканского континента занимает Африканская платформа. Проявление сейсмичности связано в основном с областью альпийской складчатости (система горных сооружений Атласа) и областью разломов “Великого Рифта Африки” [1, 14, 15].

В более современных исследованиях, например в [8, 11], также подтверждается, что землетрясения в Марокко не превышали $M = 6.0$ и в основном происходили на Средиземноморском побережье и в районе гор Атлас (рис. 4). Известно разрушительное землетрясение 29.02.1960 г. в Агадире (координаты 30.45° с.ш., 9.62° з.д., $M_d = 5.9$), эпицентр которого был удален примерно на 200 км к юго-западу от эпицентра 08.09.2023 г. По [11] “ужасное землетрясение опустошило Агадир и его окрестности, ущерб катастрофичен: более 12 000 человек погибли, тысячи получили ранения, было

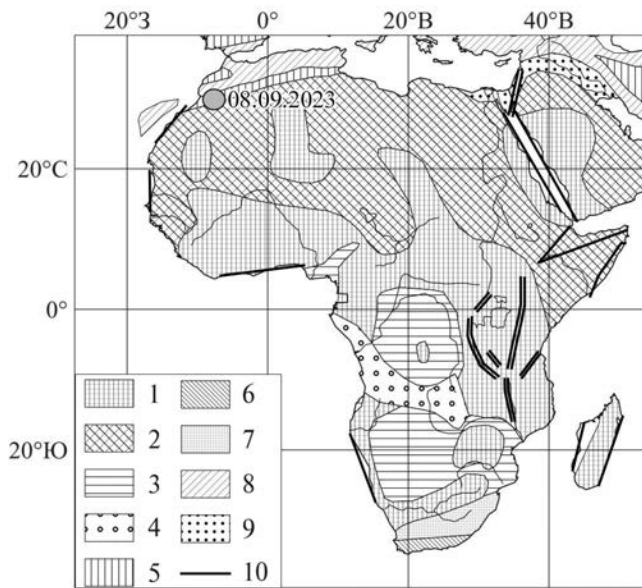


Рис. 2. Копия рисунка “Тектоническая карта Африки” из [1] с обозначением эпицентра землетрясения 08.09.2023 г.

1 – докембрийский фундамент Африканской платформы, выходящий на поверхность; 2 – области неглубокого погружения докембрийского фундамента; 3 – области глубокого погружения докембрийского фундамента; 4 – внутриплатформенные каледонские складки; 5 – герцинские складки; 6 – капские складки; 7 – предгорный прогиб Карру; 8 – альпийские складки; 9 – Месопотамско-Сирийский предгорный прогиб; 10 – основные разломы.

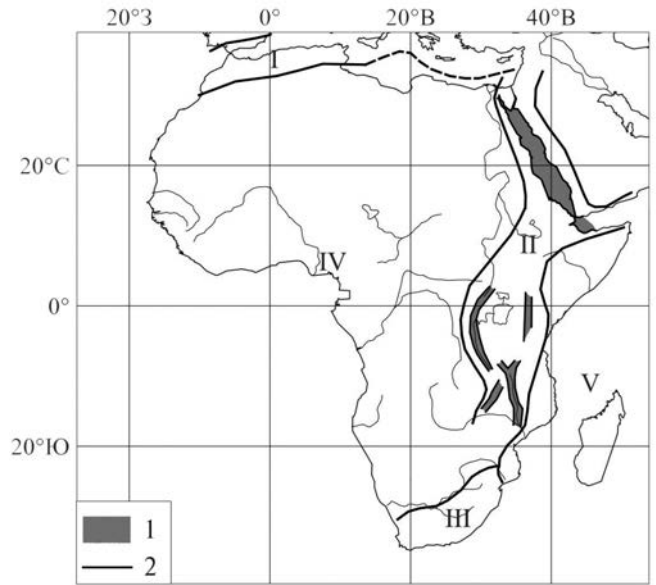


Рис. 3. Сейсмотектонические зоны Африки (частичная копия рисунка карты “Эпицентров землетрясений Африки” из [1]).

1 – Восточно-африканские грабены; 2 – границы сейсмотектонических зон I–V: I – область альпийской складчатости (система горных сооружений Атласа), II – область разломов “Великого Рифта Африки”, III – область капских складок, IV – область неглубокого залегания докембрийского кристаллического фундамента, V – то же, что и IV, но по восточному побережью Африки.

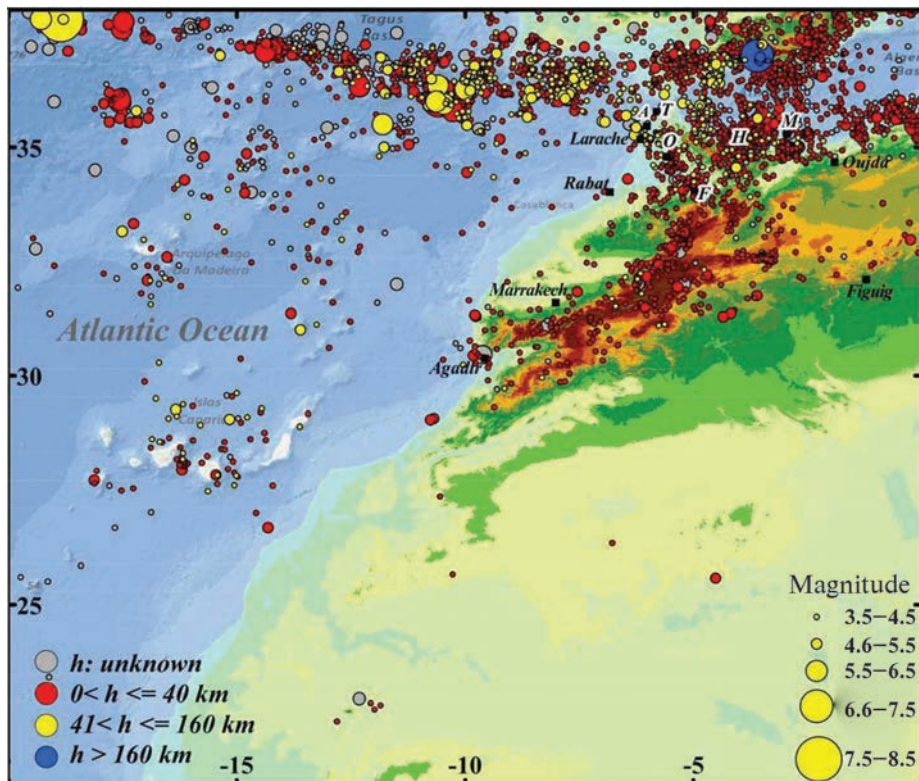


Рис. 4. Сейсмичность Марокко и его окружения (1901–2010 гг.) [11].

разрушено более 75% зданий. В населенных пунктах Ячеч, Касба, Адуар, Фаунти Талборжт более 90% зданий были разрушены или повреждены. Несмотря на небольшое значение магнитуды ($M_d = 5.9$), масштаб негативных последствий можно объяснить низким качеством строительства и небольшой глубиной гипоцентра (3 км), а также близостью к городу”.

В [18] опубликован каталог основных марокканских землетрясений с 1045 по 2005 г. Авторы этой работы задались целью создания каталога однородных по магнитуде землетрясений для дальнейшего его использования в исследовании сейсмической опасности. В представленном каталоге лишь одно 9-балльное землетрясение 1731 г. имело $M_w = 6.4$, его эпицентр находился примерно в 200 км к юго-западу от эпицентра землетрясения 08.09.2023 на побережье Атлантического океана (видимо в близкой зоне к эпицентру землетрясения 29.02.1960 г.). Эпицентры всех других сильных землетрясений Марокко были приурочены к рифтовым структурам в Средиземноморье.

Из вышеизложенного следует, что землетрясение 08.09.2023 г. было самым сильным в горах Атласа за всю историю, и, безусловно, может быть предметом для нашего исследования в целях калибровки системы “Экстремум” для районов северо-западной части Африки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

08.09.2023 г. С $M = 6.8$ В МАРОККО

Расчеты моделирования последствий землетрясения проводятся с помощью системы “Экстремум” в первые минуты после определения параметров землетрясения для принятия решения о проведении спасательных и других экстренных операций. Точность оперативного прогноза последствий существенно повышается, если для данной сейсмоопасной территории заблаговременно определены рейтинг сейсмологических служб и параметры зависимостей, описывающих особенности затухания сейсмической интенсивности I_t , и региональные особенности поведения элементов риска.

В качестве региональных зависимостей затухания сейсмической интенсивности в данной статье были использованы результаты исследований, полученные в работах [7, 10] для Марокко и сопредельных территорий. Региональные оценки затухания интенсивности для зоны Атласских гор и Алжира [7] оказались близкими к зависимостям N.N. Ambraseys [6] для Балканского региона. Этот факт объясняется принадлежностью рассматриваемых территорий к одной и той же тектонической зоне – зоне альпийской складчатости [1, 14], и позволяет тестировать применимость аналогичных

зависимостей для моделирования последствий землетрясения 08.09.2023 г. в Марокко.

В статье для проверки сходимости расчетных и наблюдаемых интенсивностей использованы уравнения:

– для зоны Верхнего и Среднего Атласа (НМ) [10], $h_{cp} = 9.7$ км:

$$I = 1.72M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 1.51, \quad (1)$$

$$I = 1.4M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 2.5; \quad (2)$$

– для зоны Западного Высокого Атласа (НО) [10], $h_{cp} = 1.4$ км:

$$I = 1.72M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 1.02, \quad (3)$$

$$I = 1.4M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 0.62; \quad (4)$$

– для зоны Верхнего и Среднего Атласа (НМ) [10], $h_{usgs} = 26$ км:

$$I = 1.72M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 2.81, \quad (5)$$

$$I = 1.4M - 1.3 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0013 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 3.5; \quad (6)$$

– для Алжира [7]:

$h_{cp} = 6.82$ км,

$$I = 1.43M - 2.28 \ln \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) - 0.0004 \left(\sqrt{\Delta^2 + h^2} \right) + 6.29 \pm 0.24P, \quad (7)$$

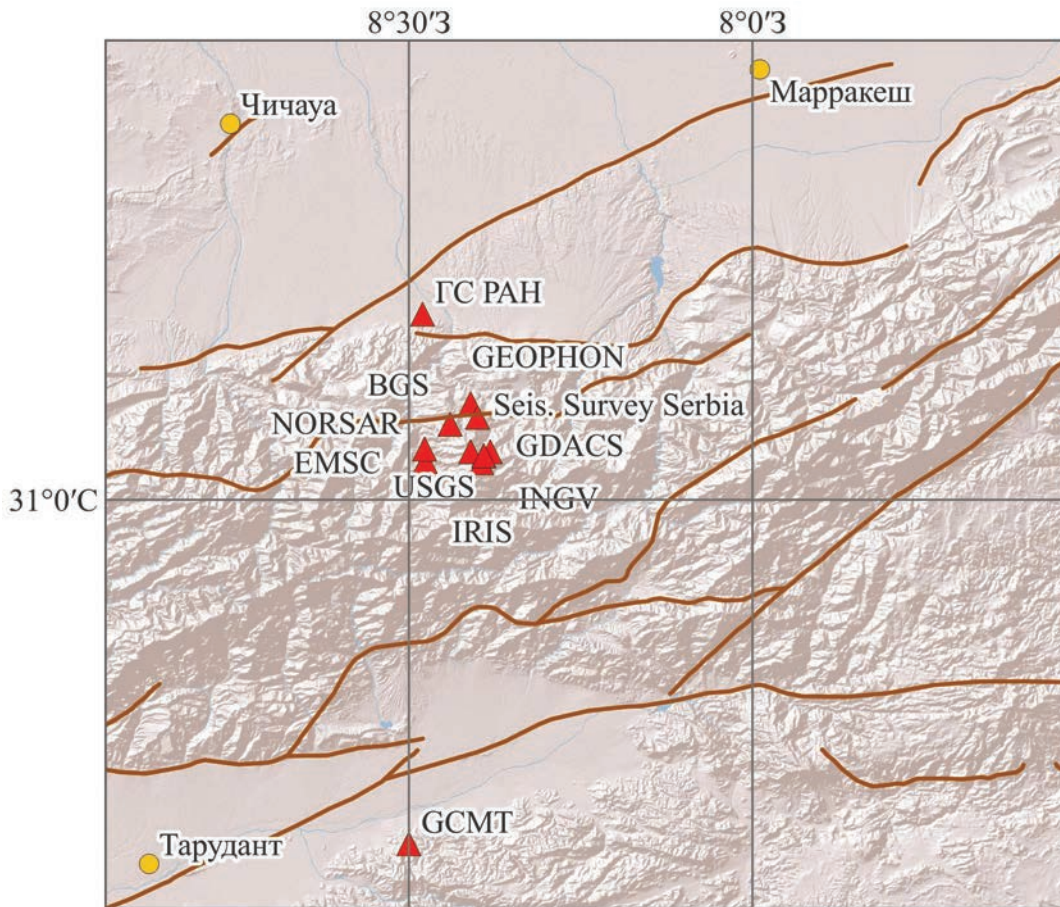


Рис. 5. Координаты эпицентра землетрясения 08.09.2023 г. в Марокко по данным разных сейсмологических служб в оперативном режиме.

$h_{usgs} = 26$ км,

$$I = 1.43M - 2.28 \ln(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) - 0.0004(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) + 6.29 \pm 0.24P; \quad (7a)$$

– для Атласских гор [7]:

$h_{cp} = 4.82$ км,

$$I = 1.48M - 2.05 \ln(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) - 0.00074(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) + 5.16 \pm 0.35P; \quad (8)$$

$h_{usgs} = 26$ км,

$$I = 1.48M - 2.05 \ln(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) - 0.00074(\sqrt{\Delta^2 + h^2}) + 5.16 \pm 0.35P; \quad (8a)$$

– для юго-восточной Турции [12]:

$$I = 1.82M - 1.38 \ln(\Delta + 7) - 0.99; \quad (9)$$

– для территории Турции [12]:

$$I = 2.12M - 1.38 \ln(\Delta + 7) - 2.72, \quad (10)$$

где Δ – эпицентральное расстояние, км; h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения (инструментально определенное значение M_s или пересчитанное из других оценок).

Моделирование возможного распределения интенсивностей для события 08.09.2023 г. было выполнено с использованием уравнений (1) – (10) для коэффициента сжатия эллипса $k = 1.5$ с учетом ориентации эллипса макросейсмического поля под углом 255° в соответствии с решением механизма очага.

Учитывая небольшой разброс в определении координат эпицентра сейсмологическими службами в оперативном режиме (минимальное расстояние 1.1 км, среднее – 14.1 км) (рис. 5) и то, что плотность населения провинции Марракеш-Сафи по данным <http://www.statoids.com/uma.html> на 2014 г. составляла 117.6 чел/км², что в 2.6 раза выше, чем в среднем по стране, расчеты проводились для параметров USGS $\phi = 31.064^\circ$ с.ш.; $\lambda = 8.391^\circ$ з.д. Использовалась глубина очага

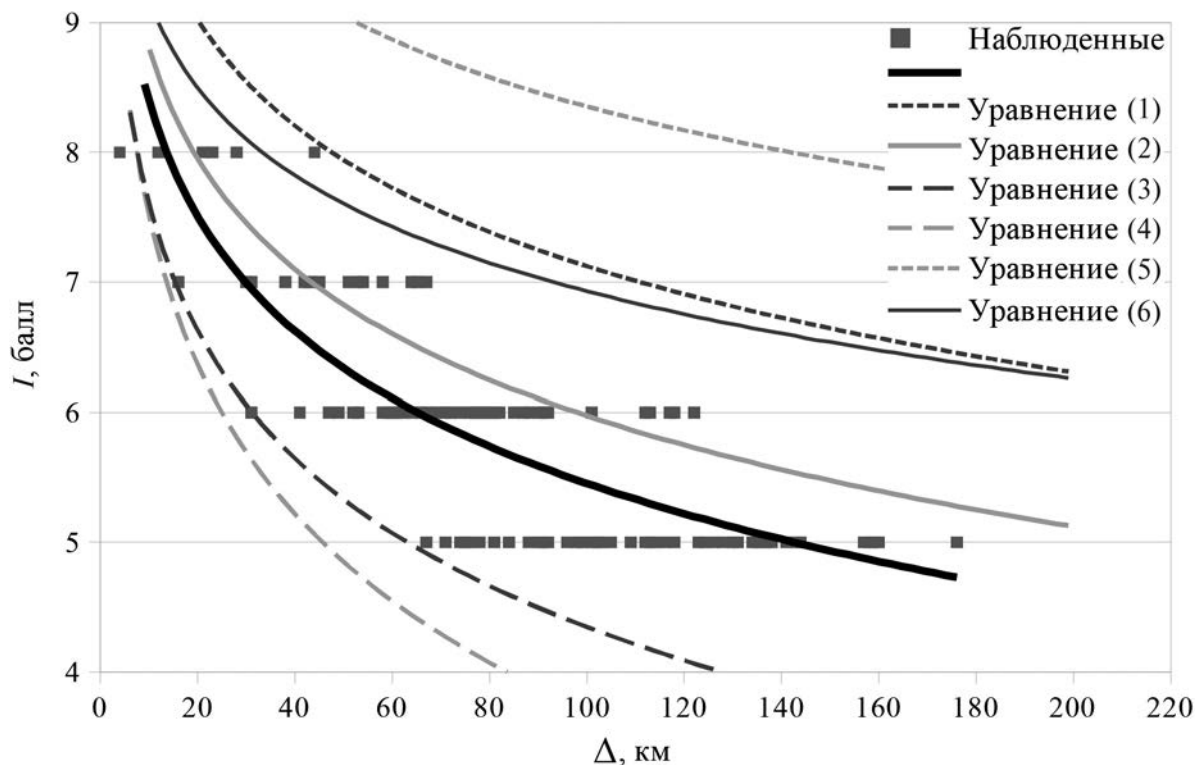


Рис. 6. Сравнение наблюдаемой и расчетных интенсивностей для уравнений (1)–(6) [10].

$h_{\text{usgs}} = 26$ км по данным USGS и средние глубины для зоны h_{cp} в соответствии с рекомендациями авторов зависимостей [7, 10].

Уравнения (1)–(6) получены преобразованием уравнения Шпонхоера-Ковеслигети [19]:

$$I_0 - I = 3 \log \left(\frac{\sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) + 1.3a \left(\sqrt{R^2 + h^2} - h \right) \quad (11)$$

к виду

$$I = aM - b \ln \left(\sqrt{R^2 + h^2} \right) + c \left(\sqrt{R^2 + h^2} \right) + d, \quad (12)$$

где Δ – эпицентральный расстояние, км; h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения, I_0 – интенсивность в эпицентре, балл; a , b , c , d – коэффициенты.

Для пересчета магнитуд в (1), (3), (5) использовалась зависимость $M(I_0)$ вида:

$$M = 0.58I_0 + 0.85, \quad (13)$$

в (2), (4), (6):

$$M = 0.716 I_0 + 0.517 \log(h) - 0.207, \quad (14)$$

где h – глубина очага, км; M – магнитуда землетрясения, I_0 – интенсивность в эпицентре, балл.

Для выбора уравнения затуханий интенсивности, которые в случае повторения события могут быть использованы в оперативной оценке потерь, расчетные значения интенсивности I_i сравнивались с наблюдаемыми по данным GDACS [<https://www.gdacs.org/>].

Задача состояла в выборе и запоминании наиболее вероятных параметров, которые могут быть применены в случае повторения события в рассматриваемой зоне.

На рис. 6 приведены результаты сравнения расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей сотрясений I (точки и аппроксимирующая их кривая) при использовании уравнений затухания (1)–(6) [10].

Анализ рис. 6 показывает систематическое завышение расчетной интенсивности I при использовании уравнений (1), (5) и (6). При использовании уравнения (5) разница составляет несколько баллов. Уравнения (3) и (4) дают систематическое занижение расчетной интенсивности I . На расстояниях до 20–30 км эта разница незначительна, порядка 0.2–0.3 балла, с увеличением эпицентрального расстояния разница возрастает и на расстояниях 80–120 км достигает 1.5–2 балла. Наилучшая сходимость получена для уравнения (2) для зоны Верхнего и Среднего Атласа. На расстояниях до 50 км разница составляет 0.2 балла, на расстояниях свыше 160 км она увеличивается на 0.4 балла.

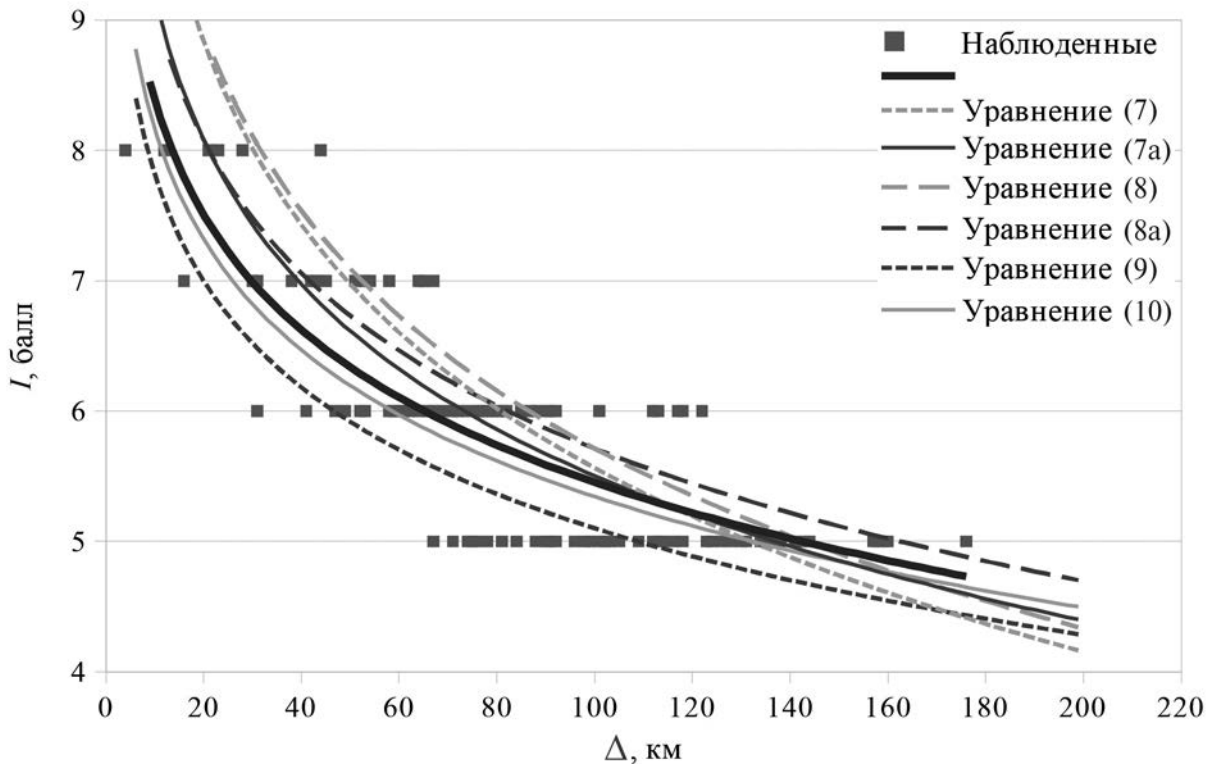


Рис. 7. Сравнение наблюдаемой и расчетных интенсивностей для уравнений (7), (7а), (8), (8а) по [7]; (9), (10) по [12].

Таблица 1. Отклонения наблюдаемых и расчетных интенсивностей ΔI для разных баллов при использовании уравнений (1)–(10)

I , балл	Уравнения затухания интенсивности											
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(7a)	(8)	(8a)	(9)	(10)
5	2.0	0.8	-0.9	-1.6	3.2	1.8	0.3	0.3	0.4	0.4	0.0	0.2
6	1.4	0.3	-1.2	-2.0	2.7	1.2	0.1	-0.1	0.3	0.2	-0.6	-0.3
7	1.2	0.1	-1.5	-1.9	2.3	0.9	0.3	0.1	0.4	0.1	-0.9	-0.7
8	1.2	0.0	-1.5	-1.7	1.8	0.3	1.0	0.0	1.0	-0.2	-0.8	-0.7
I_{cp}	1.6	0.5	-1.1	-1.7	2.8	1.4	0.3	0.1	0.4	0.3	-0.4	-0.1

На рис. 7 приведены результаты сравнения расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей сотрясений I (точки и аппроксимирующая их кривая) при использовании уравнений затухания (7, 7а, 8, 8а), а также (9) и (10).

Анализ рис. 7 показывает наилучшую сходимость расчетных и наблюдаемых значений интенсивностей I для уравнения (10) для территории Турции]. Уравнения (7), (7а) для Алжира и (8), (8а) для Атласских гор дают завышенные оценки расчетной интенсивности I_i от 0.3 до 1 балла на близких расстояниях, на расстояниях более 120 км расчетные значения I_i приближаются к наблюдаемым. Но уравнение (7а) дает почти совпадающие оценки расчетных и наблюдаемых I_i на эпицентральных расстояниях $\Delta > 70$ км.

В табл. 1 приведены значения отклонений наблюдаемых и расчетных интенсивностей ΔI при использовании разных уравнений затухания.

Анализ рис. 6, 7 и табл. 1 позволяет сделать вывод о хорошей сходимости между наблюдаемыми и расчетными интенсивностями I_i при использовании уравнений (2), (7а), (8а) и (10).

На рис. 8 приведены результаты моделирования последствий землетрясения 08.09.2023 г. с $M = 6.8$ в Марокко с помощью системы “Экстремум” для уравнений затухания интенсивности (2) для зоны Верхнего и Среднего Атласа и (8а) для Атласских гор. Степени повреждений зданий приведены по шкале ММСК-86 [4], где $d = 1$ – легкие повреждения, $d = 2$ – умеренные повреждения, $d = 3$ – тяжелые повреждения, $d = 4$ – частичные

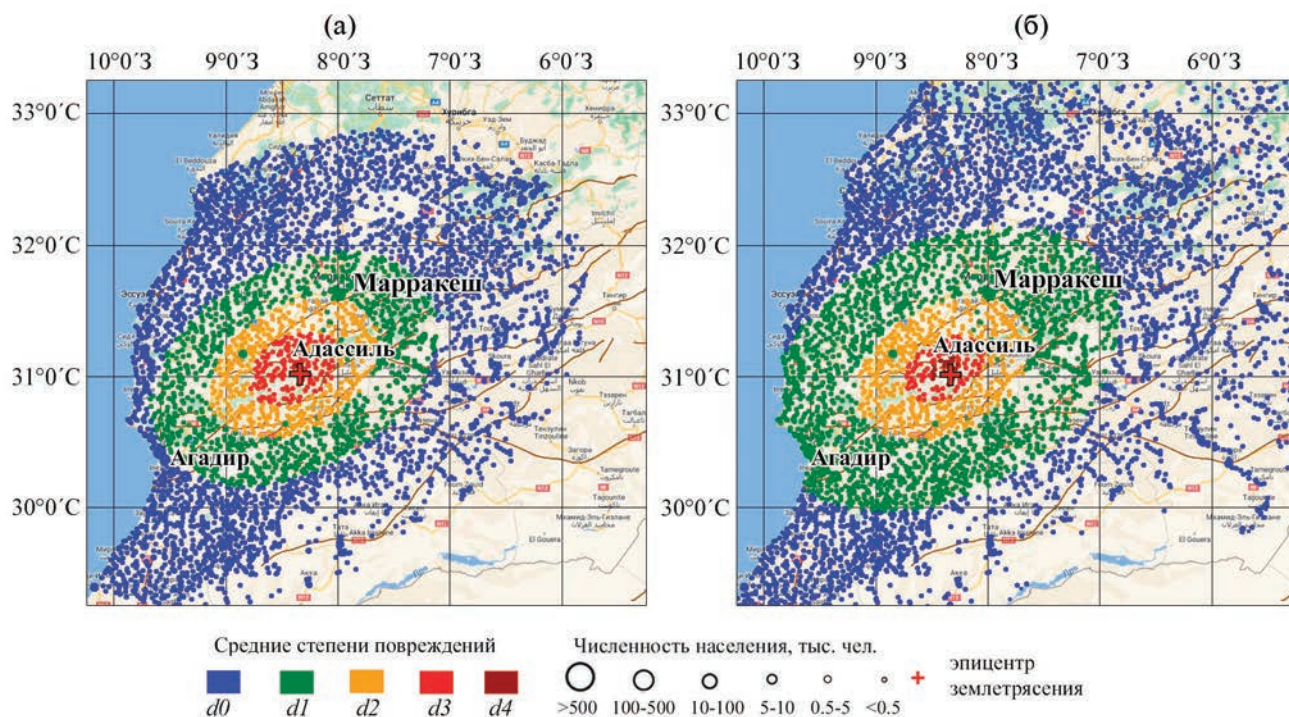


Рис. 8. Моделирование последствий землетрясения 08.09.2023 г. с $M = 6.8$ в Марокко с помощью системы “Экстремум” для уравнения: а – (8а), б – (2). Средние степени повреждений: d_0 – нет повреждений, d_1 – легкие, d_2 – умеренные, d_3 – тяжелые, d_4 – частичные разрушения.

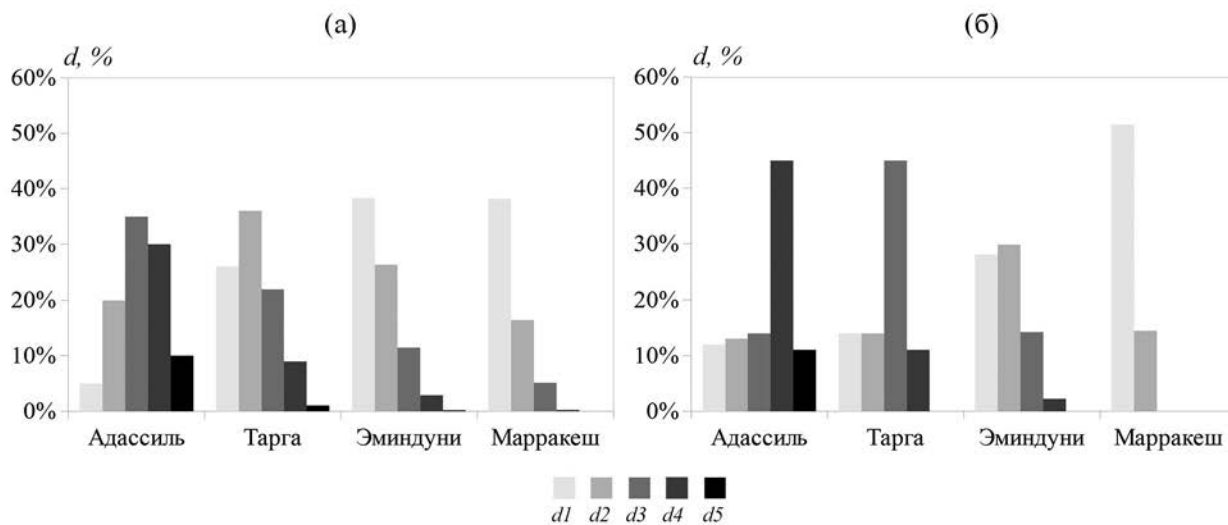


Рис. 9. Диаграммы средних степеней повреждений для отдельных населенных пунктов для (7а) для Алжира [7]: а – матрица повреждений по [9]; б – матрицы повреждений по шкале EMS-92.

разрушения, $d = 5$ – обвалы. Для расчета степеней повреждения d использовалась матрица повреждений по [9].

При использовании уравнений (7а) для Алжира и (10) для территории Турции были получены близкие результаты в определении средних степеней повреждений d_{cp} зданий в населенных пунктах при использовании матрицы повреждений [9].

Для изучения влияния матрицы повреждений на оценки потерь были выполнены расчеты

последствий для уравнения (7а) с использованием матрицы [9] и матрицы по шкале EMS-92.

Анализ рис. 9 показывает, что оценки вероятности отдельных расчетных степеней повреждения зданий при использовании разных матриц повреждений имеют значительный разброс. Для населенного пункта Эминдуни оценки вероятности степени $d = 1$ для разных матриц отличаются на 27%. Для населенных пунктов Марракеш и Эминдуни оценки вероятности возможных

Таблица 2. Вероятности степеней повреждений для отдельных населенных пунктов при использовании уравнения (7а) для Алжира

Населенный пункт	Вероятность степеней повреждений при использовании матриц по [9] (в числителе) и по шкале EMS 92 (в знаменателе)					
	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$	d_{cp}
Adassil (Адассиль)	0.05/0.12	0.20/0.13	0.35/0.14	0.30/0.45	0.10/0.11	3.20/3.15
Targua (Тарга)	0.26/0.14	0.36/0.14	0.22/0.45	0.09/0.11	0.01/0.0	2.05/2.21
Imindounite (Эминдуни)	0.38/0.28	0.26/0.30	0.11/0.14	0.03/0.02	0.0/0.0	1.37/1.39
Marrakech (Марракеш)	0.38/0.51	0.16/0.14	0.05/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.87/0.80

(а)

(б)



Рис. 10. Снимки населенных пунктов: а – Адассиль, б – Тарга.[UNOSAT. Preliminary_Assessment_Report_EQ20230909MAR_Adassil_10Sep2023-1].

степеней $d = 2$ не превышает 14%. А для Адассиль разница в оценках вероятности степени повреждения $d = 3$ при использовании разных матриц составила 60%.

В табл. 2 приведены значения вероятностей разных степеней повреждений для отдельных населенных пунктов при использовании уравнения (7а) и двух матриц повреждений.

Разница в оценке средних степеней повреждений d_{cp} варьирует от 1.4% для Эминдуни до 8% для Марракеша (см. табл. 2). Т.е. использование разных матриц повреждения не оказывает сильного влияния на оценки средних степеней повреждения d_{cp} для населенных пунктов в целом с учетом застройки разного типа.

Сравнение полученных оценок ущерба для Адассиль и Тарга, расположенных в сильно пострадавшей провинции Chichaoua (Чичауа), с космическими снимками показывает удовлетворительную сходимость в оценках расчетных и наблюдаемых потерь. На рис. 10 приведены

космические снимки UNOSAT из предварительного отчета EQ20230909MAR от 10.09.2023 г., на которых наблюдается соответствие расчетных и реальных оценок степеней повреждения $d = 4$ и $d = 5$ в этих населенных пунктах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе калибровки модели макросейсмического поля системы “Экстремум” для территории Марокко выполнен анализ применимости уравнений затухания сейсмической интенсивности, полученных исследователями в разные годы для зоны Верхнего и Среднего Атласа [10], Алжира и Атласских гор [7] и территории Турции [12].

Для оценки возможных последствий землетрясения 08.09.2023 г. применялись методы имитационного компьютерного моделирования с использованием системы “Экстремум”, разработанной с участием авторов данной статьи. Результаты моделирования последствий землетрясения показали хорошую сходимость наблюдаемых

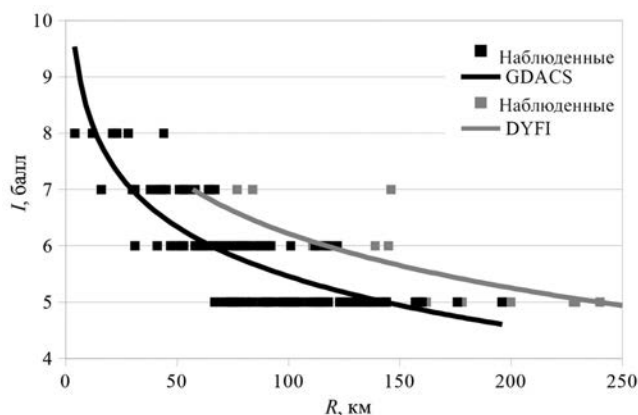


Рис. 11. Сравнение наблюдаемых значений интенсивности в населенных пунктах по данным GDACS и DYFI USGS.

и расчетных значений интенсивности I_i при использовании уравнений для зоны Верхнего и Среднего Атласа, Алжира и Турции.

При использовании уравнения для зоны Верхнего и Среднего Атласа [10] на расстояниях до 50 км разница ΔI составляет 0.2 балла, на расстояниях более 160 км – 0.4 балла. Наилучшая сходимость наблюдаемых и расчетных значений интенсивностей I_i получена для уравнения для территории Турции [12], на всех эпицентральных расстояниях ΔI не превышает 0.1 балла. Уравнения для Алжира и Атласских гор [7] дают завышенные оценки расчетной интенсивности I_i от 0.3 до 1 балла на близких расстояниях, на расстояниях более 120 км расчетные значения I_i приближаются к наблюдаемым. На эпицентральных расстояниях $\Delta > 70$ км уравнение для Алжира [7] дает почти совпадающие оценки расчетных I_i и наблюдаемых значений интенсивности.

Оценки, полученные в настоящем исследовании, носят предварительный характер. Процедура калибровки региональных моделей затухания сейсмической интенсивности должна выполняться с использованием уточненной макросейсмической информации по отдельным населенным пунктам. Такая информация может быть доступна только через месяцы или годы.

В настоящем исследовании расчетные значения интенсивности I_i сравнивались с наблюдаемыми значениями интенсивности для населенных пунктов в соответствии с информацией, размещенной на сайте GDACS [gdacs.org], которые, судя по расхождениям с информацией, размещенной на сайте DYFI Геологической службы США, также является неокончательной.

Информация на сайте DYFI дает завышенные оценки наблюдаемой интенсивности по сравнению данными GDACS. Разница достигает 0.7–0.8 балла (рис. 11). На сайте DYFI приведены данные

об ощущениях для населенных пунктов на расстояниях 50 км и более от эпицентра.

Несмотря на то, что полученные оценки расчетных интенсивностей носят предварительный характер использование уравнения затухания сейсмической интенсивности для Алжира [7] позволяет получить расчетные средние степени повреждения $d_{ср}$ застройки для наиболее сильно пострадавших населенных пунктов близкие к наблюдаемым на 10 января 2023 г. [UNOSAT_Preliminary_Assessment_Report_EQ20230909MAR_Adassil_10Sep2023-1].

ВЫВОДЫ

Процедура калибровки региональных моделей затухания сейсмической интенсивности предполагает выделение границ зон с квазистабильными параметрами поля. В дальнейшем для уточнения калибруемых параметров поля и определения границ зон для их применения необходимо проведение работ по сбору информации о макросейсмических проявлениях прошлых событий в рассматриваемом регионе.

Для успешной калибровки моделей макросейсмического поля системы “Экстремум” и других глобальных систем, используемых для оперативной оценки последствий землетрясений, необходимо создание и своевременное пополнение базы знаний о макросейсмических и инженерно-сейсмологических последствиях землетрясений. В этой связи представляется важным международное сотрудничество в области обработки “больших данных” (Big Data) и создание распределенной базы знаний о физических и социально-экономических последствиях прошлых сильных землетрясений в рамках проектов ООН/КОДАТА с указанием границ калибровочных зон.

Авторы выражают благодарность своим коллегам за постоянную поддержку, обсуждение методических вопросов по калибровке моделей для оценки последствий землетрясений в оперативном режиме. Особая благодарность сотрудникам ООО ЦИЭКС за плодотворное сотрудничество и вклад в развитие среды системы “Экстремум”

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий” и государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01271-23.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков Г.П. О сейсмичности Африки // Бюлл. совета по сейсмол. М.: Изд-во АН СССР, 1963. № 13. 40 с.
2. Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Гуцин А.И. Георгий Петрович Горшков – ученый, педагог, организатор //

- Прикладные аспекты динамической геологии. 2019. С. 4–12.
3. Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Малаева Н.С. Калибровка системы “Экстремум”: предварительные результаты оценки последствий разрушительного землетрясения 06.02.2023 г. в Турции // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 3. С. 44–70. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-4>
 4. Шебалин Н.В., Ершов И.А., Шестоперов Г.С., Гехман А.С. Улучшенный вариант шкалы сейсмической интенсивности (ММСК-86) на базе шкал MSK-64 и МСССС-73 (заключительный отчет). М.: МСССС, ИФЗ, 1986. 61 с.
 5. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео, 2014. 362 с.
 6. Ambraseys N.N. Intensity-attenuation and magnitude-intensity relationships for northwest European earthquakes // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1985. V. 13. P. 733–788.
 7. Benouar D. Magnitude-Intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1994. V. 23. P. 717–727.
 8. Chalouan, A., Gil, A. J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P. et al. Active faulting in the frontal Rif Cordillera (Fes region, Morocco): Constraints from GPS data // Journal of Geodynamics. 2014. V. 77. P. 110–122.
 9. Chavez J., Goula X., Roca A. et al. Preliminary risk assessment for Catalonia (Spain) // Proc. XI European Conf. Earthq. Engineer., Paris, France, 1998.
 10. Cherkaoui T.E. Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc. Géophysique [physics.geo-ph]. Université Joseph-Fourier. Grenoble I. 1991. 247 p.
 11. Cherkaoui T.E., El Hassani A. Seismicity and Seismic hazard in Morocco // Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre. 2012. V. 34. P. 45–55.
 12. Earthquake risk reduction in the Balkan region. UNDP Project executed by UNESCO in association with UNDRO. (RER/79/014). Working Group A “Seismology, Seismotectonics, Seismic Hazard and Earthquake Prediction”, Final Report. Athens. December 1982. 152 p.
 13. Farías C. A Foreign Geophysicist in Marrakesh during Morocco's Largest Earthquake // Seismological Research Letters. 2024, 95 (1): 1–3. <https://doi.org/10.1785/0220230334>
 14. Gorshkov G.P. Seismicity of Africa. UNESCO Publ. Provisional NS/NR/2. Add. I, Paris, 1961. P. 101–151.
 15. Gorshkov G.P. The seismicity of Africa, Chapter 3 // A review of the natural resources of the African continent. UNESCO, 1963, Printed in France, NC.62/XII.1/A. P. 101–151.
 16. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1949. P. 1–273; 1954. P. 1–310.
 17. Hancılar U., Şeşetyan K., Çaktı E., Şafak E., et al. Kahramanmaraş–Gaziantep Türkiye M 7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Strong Ground Motion and Building Damage Estimations. KOERI Preliminary Report (v6), 16.02.2023 (v6), 13.02.2023 (v5), 09.02.2023 (v4), 08.02.2023 (v3), 07.02.2023 (v2), 06.02.2023 (v1). KOERI, 2023. 42 p.
 18. Peláez J.A., Chourak M., Tadili B.A., Brahim L. A. et al. A catalog of main Moroccan earthquakes from 1045 to 2005 // Seismological Research Letters. 2007. V. 78. № 6. P. 614–621.
 19. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. Akademie-Verlag, Berlin. 1960. 117 p.

SEISMICITY OF MOROCCO AND SIMULATION OF 08.09.2023 EARTHQUAKE CONSEQUENCES WITH “EXTREMUM” SYSTEM APPLICATION

N. I. Frolova^{a,#}, I. P. Gabsatarova^{b,##}, S. P. Suchshev^{c,###}, N. S. Malaeva^a

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

^bGeophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Lenina av., 189, Obninsk, Kaluga region, 249035 Russia

^cMoscow State Technical University named after Bauman, 2-ya Baumanskaya str., 5, Moscow, 105005 Russia

[#]E-mail: frolovanina7@gmail.com

^{##}E-mail: ira@gsras.ru

^{###}E-mail: Sersan150@mail.ru

This paper reports the use of regional intensity attenuation equations for the territory of Morocco by modeling the impact of the destructive earthquake of September 8, 2023 in the country. The relevance of the study follows from the needed reliable estimates of possible loss due to earthquakes in order to aid the decision-making process for the response and the proper choice of a search and rescue strategy for the heavily affected settlements. The paper has for its goal the calibration of the “Extremum” system seismic intensity attenuation models for the territory of Morocco. Our study is the first to analyze the seismic intensity attenuation equations obtained by researchers at different times with a view to their applicability to near real time loss assessment for strong events occurring in the area of study. We investigate as well how the results of earthquake loss simulation are affected by regional damage matrixes. Computer simulation was applied to the assessment of the possible impact due to the September 8, 2023 earthquake using the “Extremum” system developed with authors’ participation. This paper provides preliminary results of modeling the impact of the Morocco earthquake, as well as an assessment of the convergence achieved by calculated and observed intensities for various intensity prediction equations obtained before for the Morocco and adjacent areas within the Alpine-Himalayan seismically active belt.

Keywords: real time earthquake loss estimation, information system “Extremum”, calibration of the models, macroseismic field, strong earthquake, Morocco

REFERENCES

1. Gorshkov G.P. [The seismicity of Africa]. *Byull. Soveta po seismologii* Moscow, USSR Academy of Sciences Publ, 1963, no. 13, 40 p. (in Russian)
2. Koronovskii N.V., Bryantseva G.V., Gushchin A.I. [Georgiy Petrovich Gorshkov – scientist, teacher, organizer]. *Prikladnye aspekty dinamicheskoi geologii*, 2019, pp. 4–12. (in Russian)
3. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Sushchev S.P., Malaeva N.S. [Calibration of the Extremum system: preliminary results of assessing the consequences of the devastating earthquake of 02.06.2023 in Turkey]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2023, vol. 50, no. 3, pp. 44–70. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-4> (in Russian)
4. Shebalin N.V., Ershov I.A., Shestoporov G.S., Gekhman A.S. [Improved version of the seismic intensity scale (MMSK-86) based on the MSK-64 and MSSSS-73 scales (final report)]. Moscow, MSSSS, IFZ Publ., 1986. 61 p. (in Russian)
5. Sherman S. I [Seismic process and earthquake forecast: tectonophysical concept]. LLC Academic Publ. House Geo Publ, 2014. 362 p. (in Russian)
6. Ambraseys N.N. Intensity-attenuation and magnitude-intensity relationships for northwest European earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1985, vol. 13, pp. 733–788.
7. Benouar D. Magnitude-Intensity and intensity-attenuation relationships for Atlas region and Algerian earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1994, vol. 23, pp. 717–727.
8. Chalouan, A., Gil, A. J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P. et al. Active faulting in the frontal Rif Cordillera (Fes region, Morocco): Constraints from GPS data. *Journal of Geodynamics*, 2014, vol. 77, pp. 110–122.
9. Chavez J., Goula X., Roca A. et al. Preliminary risk assessment for Catalonia (Spain). *Proc. XI European Conf. Earthq. Engineer.*, Paris, France, 1998.
10. Cherkaoui T.E. Contribution a l'étude de l'alea sismique au Maroc. Geophysique [physics.geo-ph]. Universite Joseph-Fourier, Grenoble I. 1991. 247 p. (in French)
11. Cherkaoui T.E., El Hassani A. Seismicity and Seismic hazard in Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*. 2012, vol. 34, pp. 45–55.
12. Earthquake risk reduction in the Balkan region. UNDP Project executed by UNESCO in association with UN-DRO. (RER/79/014). Working Group A “Seismology, Seismotectonics, Seismic Hazard and Earthquake Prediction”, Final Report. Athens. December 1982. 152 p.
13. Farias C.A. Foreign Geophysicist in Marrakesh during Morocco's Largest Earthquake. *Seismological Research Letters*, 2024, 95 (1): 1–3. <https://doi.org/10.1785/0220230334>.
14. Gorshkov G.P. Seismicity of Africa. UNESCO Publ. Provisional NS/NR/2. Add. I, Paris, 1961, pp. 101–151.
15. Gorshkov G.p P. The seismicity of Africa, Chapter 3. In: A review of the natural resources of the African continent. UNESCO, Printed in France, NC.62/XII.1/A, 1963, pp. 101–151.
16. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1949, pp. 1–273; 1954, pp. 1–310.
17. Hancılar U., Şeşetyan K., Çaktı E., Şafak E., et al. Kahramanmaraş–Gaziantep Türkiye M 7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Strong Ground Motion and Building Damage Estimations. KOERI Preliminary Report (v6), 16.02.2023 (v6), 13.02.2023 (v5), 09.02.2023 (v4), 08.02.2023 (v3), 07.02.2023 (v2), 06.02.2023 (v1). KOERI, 2023. 42 p.
18. Peláez, J.A., Chourak, M., Tadili, B.A., Brahim, L.A. et al. A catalog of main Moroccan earthquakes from 1045 to 2005. *Seismological Research Letters*, 2007, vol. 78, no. 6, pp. 614–621.
19. Sponheuer W. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. Akademie-Verlag, Berlin.1960. 117 p. (in German)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 546.49:551.341 (571.56)

РТУТЬ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ УРБАНИЗИРОВАННОЙ
ТЕРРИТОРИИ В КРИОЛИТОЗОНЕ© 2024 г. В. Н. Макаров^{1,*}¹Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, 36, Якутск, 677010 Россия

*E-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию 29.10.2023 г.

После доработки 19.02.2023 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Рассматриваются геохимические особенности миграции ртути в окружающей среде города, расположенного в криолитозоне. Среднее содержание Hg во взвешенных веществах приземной атмосферы колеблется от 0.11–0.22 зимой до 13–14 мг/т летом. Суммарный объем годового поступления Hg со взвешенными веществами из атмосферы на поверхность оценивается в 11 мкг/м²/год, 99% которого приходится на теплое время года. Анализ литохимических съезок на территории города показал, что среднее содержание Hg в городских почвах изменяется в пределах 6–22 мг/т. Наличие сезонноталого слоя, мерзлых и многолетнемерзлых пород определяет бинарное строение культурного слоя и контрастное распределение Hg в грунтах. Установлено, что возникновение аномальных концентраций Hg в грунтах культурного слоя определяется в основном поступлением загрязнителей в твердой и жидкой фазах и, в меньшей степени, поступлением из атмосферы и химическим составом аллювиального субстрата. Возникновение аномалий Hg в грунтах культурного слоя возрастом более 100 лет определяется преимущественно биофильным накоплением Hg в органических объектах жизнедеятельности домашних животных и человека. Максимальные содержания Hg до 2000–5000 мг/т, наблюдаются в сезонноталых грунтах в интервале глубин 1–4 м, с продолжительностью техногенного воздействия более 150 лет. В районах города с меньшим возрастом техногенного воздействия Hg также фиксируется в сезонноталых и мерзлых грунтах, при средней концентрации 50–120 мг/т, или образует слабоконтрастные аномалии только в почвенно-растительном слое.

Ключевые слова: атмосфера, взвешенные вещества, почвы, грунты, культурный слой, криолитозона, урбанизация, ртуть

DOI: 10.31857/S0869780924020042; EDN: DZQRIT

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных экологических задач является обеспечение экологической безопасности селитебных зон. Среди значительного спектра токсичных химических элементов наибольший интерес для оценки состояния компонентов окружающей среды и эколого-геохимической обстановки представляет ртуть. Ртуть и ее соединения – высоко токсичные вещества [3, 6, 10, 22, 25], относятся к веществам I-го класса гигиенической опасности для человека и биоты, что определяет особую важность проблемы изучения миграции и концентрации Hg в зонах урбанизации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Геохимическая характеристика компонентов окружающей среды получена автором в результате многолетнего наблюдения за химическим

составом атмосферы, площадного литохимического мониторинга городских почв (1984–2021 гг.) и изучения керн буровых скважин. Буровые профили пройдены в районах города с различным временем освоения, от современных, возраст застройки которых менее 50 лет, до древних 300–350-летних. Их сопоставление позволяет судить о содержании Hg в грунтах культурного слоя в районах, различающихся возрастом городской застройки, а, следовательно, и техногенного воздействия.

Литохимические пробы (почвы, грунты) анализировались методом атомно-абсорбционной ртутотометрии (анализатор ртути РА-915) в Центральной геологической лаборатории ГУГГП «Якутскгеология». Содержание Hg в атмосферной пыли – масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методом в Аналитическом сертифицированном испытательном центре Института

проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН.

Цель исследования – выявить особенности миграции и концентрации Hg в компонентах окружающей среды города, расположенного в криолитозоне, на примере г. Якутск. Изучение распределения Hg в специфических условиях урбанизированных территорий, где нет специализированных “ртутных” производств, обоснованы высокой экотоксичностью Hg даже в весьма низких концентрациях [6].

ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Город Якутск протягивается вдоль левого берега р. Лена на 20 км, в широкой долине Туймаада. Якутск – крупнейший и старейший город, расположенный в пределах криолитозоны. Город интенсивно развивается, численность населения возросла с 195 тыс. человек в 2000 г. до 341 тыс. человек на 01.01.2022 г.

Планировочная структура города радиально-кольцевая. Характер застройки неравномерный: на окраинах города – преимущественно одно- и двухэтажные деревянные строения, в центральной части – капитальная застройка каменными зданиями (от 4 до 9–16 этажей), в новых микрорайонах – 9–16 этажей.

По классификации климата Якутск находится в зоне действия климата недостаточно влажного (индекс сухости от 1.0 до 2.0), умеренно теплого (в летний период), с суровой малоснежной зимой [5]. Среднегодовая температура воздуха за период непрерывных метеонаблюдений (1883–2020 гг.) варьируется в пределах от -7.2 до -12.1°C , среднегодовое количество осадков – 235 мм.

В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, выбрасывающих ежегодно 11700 т загрязняющих веществ [4]. Стационарные источники выбросов – преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции, предприятия стройиндустрии и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе. По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тыс. единиц автотранспорта, выбрасывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей.

Геологическое строение района определяется его положением в зоне стыка двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория находится на стыке Вилюйской лито-сидерофильной области с кларковым уровнем накопления V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской халькофильной зоны с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au.

Аллювиальный комплекс $aQ_{III}^4-Q_{IV}^1$ представлен в нижней части разреза галечниками и песками, а в верхней состоит из песков, супесей и суглинков, глин и торфа. В почвенном покрове на территории города доминируют урбаноземы и экраноземы различной мощности и характера образования. Как в породах аллювия, так и в почвах наблюдаются кларковое присутствие большинства редкоземельных элементов и незначительное накопление иттрия по сравнению с кларком земной коры.

Мощность многолетнемерзлых пород на территории города – 250–450 м, сезонного слоя (СТС) – 1.5–2.0 м.

Соотношение природных (климат, мерзлота, ландшафты, геология) и техногенных (городская инфраструктура, количество и состав загрязнителей) факторов определило формирование существующей эколого-геохимической ситуации в Якутске.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современные (голоценовые) аллювиальные отложения в долине р. Лена, представляющие собой почвообразующий субстрат, являются исходным поставщиком продуктов гипергенного выветривания и имеют исключительное значение для формирования современного элювия и почв. Комплекс аллювиальных отложений, представленный мелкозернистыми песками, переслаиваемыми со средне- и крупнозернистыми, а также отдельными горизонтами супесей, линзами и прослоями суглинков, залегает на размытой поверхности юрских пород на глубине 19–25 м [18].

По химическому составу поровые воды аллювиальных отложений слабокислые, близкие к нейтральным ($\text{pH} = 6.81$); слабоминерализованные (в среднем $D_{\text{sal}} = 0.025\%$); сульфатно-гидрокарбонатные, смешанные по катионам; с относительно высоким содержанием аммония.

Много или мало Hg в аллювии р. Лена можно оценить, сравнив содержания этого элемента в аллювиальных отложениях с кларком земной коры (КЗК) [2]. Результаты сравнительного анализа показывают, что для аллювиальных песчано-глинистых и песчаных отложений в районе города характерна существенная разубоженность Hg на уровне 0.4 КЗК.

В геохимических циклах Hg большую роль играет ее атмосферный перенос. Многолетние наблюдения на арктических площадках показывают большую межгодовую изменчивость атмосферной ртути, что подразумевает сильную чувствительность Hg к факторам окружающей среды и, возможно, к изменению климата [24].

В атмосферном воздухе ртуть находится в газовой и пылеаэрозольной фазах, при этом

Таблица 1. Распределение Hg в атмосферных ВВ и объемы выпадения (Pn) из атмосферы Якутска [11]

C _{мин}	C _{макс}	C _{ариф}	C _{геом}	Pn	
				мкг/м ² /сут	мкг/м ² сезон
Летние ВВ					
8	20	14	13	0.065	11.0–16.9
Зимние ВВ					
0.01	1.96	0.22	0.11	0.03×10^{-3}	5.7×10^{-3} –44

Примечание. 80 проб.

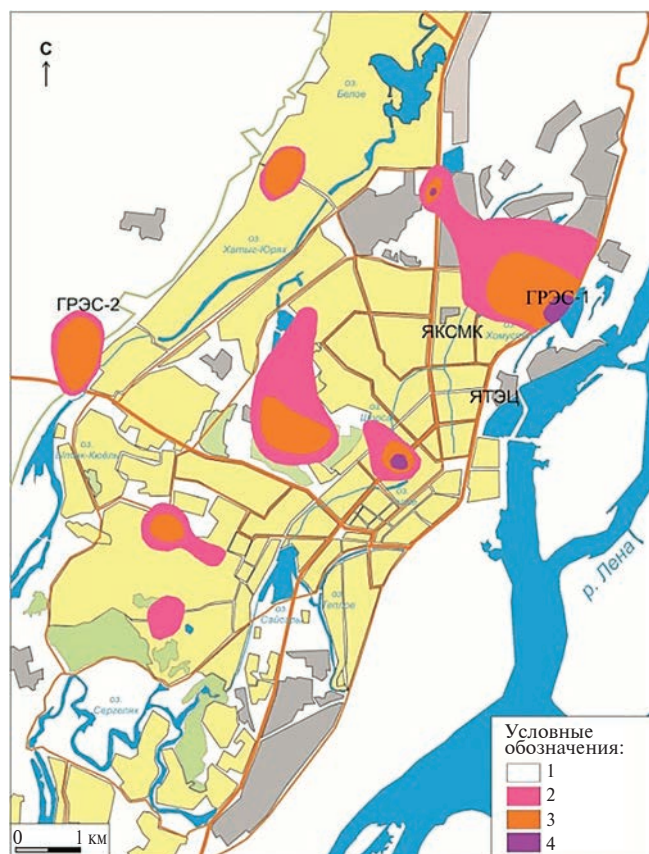


Рис. 1. Содержание Hg в зимней пыли (снежном покрове), мг/т. 1 – <0.2; 2 – 0.2–0.5; 3 – 0.5–1.0; 4 – 1.0–3.0.

в условиях техногенеза возрастает количество ртути в составе пылевой составляющей [9].

Среднее содержание Hg во взвешенных веществах (ВВ) приземной атмосферы Якутска колеблется от 0.11–0.22 (“зимняя пыль” – снег, твердая фаза) до 13–14 мг/т (“летняя пыль”). Объем выпадения Hg из атмосферы (Pn), рассчитанный с учетом средней концентрации ВВ в атмосфере [11], равен 5 г/м²/сут в теплое время года и 0.25 г/м²/сут зимой (табл. 1).

Суммарный объем годового поступления Hg с ВВ из атмосферы на поверхность оценивается

приблизительно в 11 мкг/м²/год, 99% которого приходится на теплое время года. Даже в пределах аномалий объем поступления Hg с ВВ из атмосферы не превышает 17 мкг/м²/год и не представляет существенной опасности загрязнения почвенного покрова.

Оценка содержания Hg в зимней газовой фазе, выполненная по снежному покрову, показала очень низкие содержания, менее 10 нг/л, в аэрозольной (зимней пыли) достигает 1–3 мг/т вблизи объектов энергетики и в центральной части города (рис. 1).

Уровень превышения содержания Hg в нерастворимой фазе снега над фоновыми значениями по отдельным объектам городской инфраструктуры (транспорт, энергетика, стройиндустрия) и в целом по территории города представлен в табл. 2. Максимальная аномальность, по отношению к фону (в 6.5–7.0 раз), наблюдается в районах электростанций ГРЭС-1 и ГРЭС-2, где содержание Hg в зимней пыли в 2.5 раза выше, чем в среднем по городу.

Можно полагать, что возникновение аномалий Hg вблизи объектов энергетики, сжигающих природный газ, связано с присутствием Hg в топливе. В газовом конденсате и природном газе большинства месторождений Hg присутствует естественным образом. Уровень содержания Hg в природном газе в целом не высок, но объемы добычи и использования газа таковы, что это может привести к значительным объемам выбросов Hg. В газовых месторождениях содержание Hg колеблется от менее 0.1 до 70 мкг/м³, а в конденсате – от менее 65 до 623 мкг/кг. Газ для потребителей содержит обычно очень низкий уровень Hg – около 0.05 мкг/м³ (5×10^{-8} г/м³).

Основные источники природного газа для жителей Якутска – Средневилюйское и Мастахское газоконденсатные месторождения. Поскольку о Hg в углеводородных газах стало известно сравнительно недавно (около 50 лет назад), она не всегда включалась в число компонентов, обязательных для предварительного опробования газовых и газонефтяных месторождений. Сведений о содержании Hg в природном газе и конденсате

Таблица 2. Среднее содержание Hg в зимней пыли (снежном покрове) в районе объектов городской инфраструктуры и показатель уровня аномальности

Город	Дороги	ЯТЭЦ	ГРЭС-1	ГРЭС-2	Домостроительный комбинат	Фон
Среднее содержание Hg, мг/т						
0.22	0.40	0.07	0.55	0.59	0.098	0.084
Уровень аномальности по отношению к фону						
2.6	4.8	0.8	6.5	7.0	1.2	1

Таблица 3. Содержание Hg в почвах Якутска, мг/т

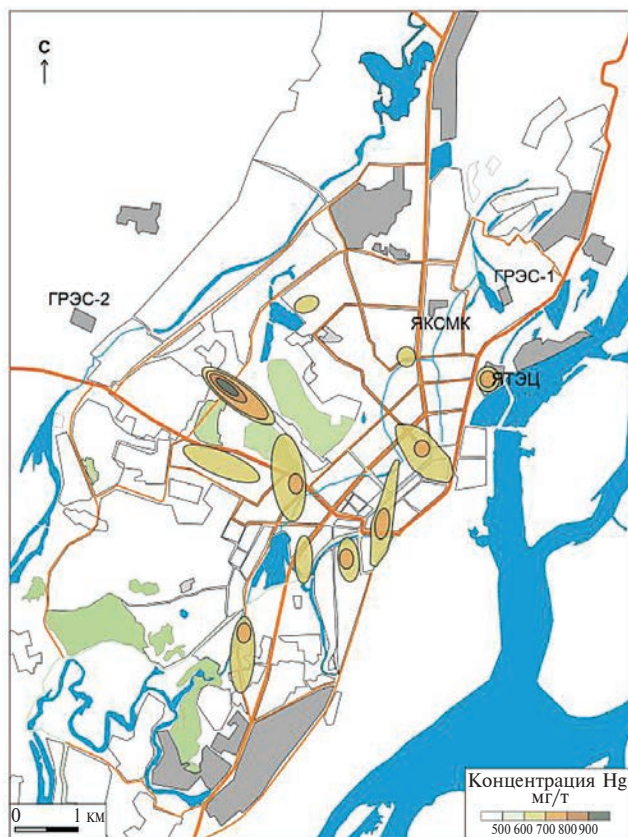
Год	1984	1993	1997	2011	2018	Среднее
С среднее	5.7	22	8	19	9.5	12.8
С максим	780	270	210	739	282	—
Количество проб	143	175	173	184	162	—
ПДК, мг/кг	Hg 2.1 (Pb+Hg: 20+1.0)					[3]

этих месторождений не найдено. Определение содержания Hg в природном газе, сжигаемом в одной из котельных города, было выполнено в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (1991 г.) по методу, разработанному и применяемому для анализа воздуха [15]. По данным анализов, среднее содержание Hg в природном газе составило 3.4×10^{-8} г/м³, при диапазоне определений $(1.3-5.4) \times 10^{-8}$ г/м³. Это примерно на два порядка выше фоновых значений для приземной атмосферы Земли [9] и соответствует средней концентрации Hg в углеводородных газах газовых и нефтегазовых месторождений России [22].

Анализ длинного ряда (1984–2018 гг.) литохимических съемок на территории города показал, что среднегодовое содержание Hg в городских почвах изменяется в пределах 6–22 мг/т, а максимальное достигает 2210 мг/т (табл. 3).

Почва, загрязненная Hg, представляет опасность, так как является источником поступления в организм человека с продуктами питания и вторичного загрязнения приземного слоя воздуха [1]. К умеренно опасной категории загрязнения почв Hg можно отнести локальные участки, расположенные преимущественно в центральной части города, где содержание Hg в почвах включает естественные концентрации Hg и вклад, связанный с распространением от конкретных местных источников при локальном переносе загрязнений. Опасной, превышающей ПДК [3], является только постоянно отмечаемая в период наблюдений аномалия Hg на старой городской свалке (Вилюйский пер.), где большие площади занимает бытовой мусор (рис. 2).

В пределах контрастных атмохимических аномалий Hg, возникающих в районах объектов энергетики, где она поступает в атмосферу в основном

**Рис. 2.** Аномалии Hg в почвах Якутска (2018 г.).

в парогазовой форме, литохимические аномалии в почвах не образуются.

Концентрации Hg в атмосферной пыли и почвах практически идентичны. Наблюдается очень слабая зависимость возрастания содержания Hg от увеличения запыленности атмосферы (рис. 3).

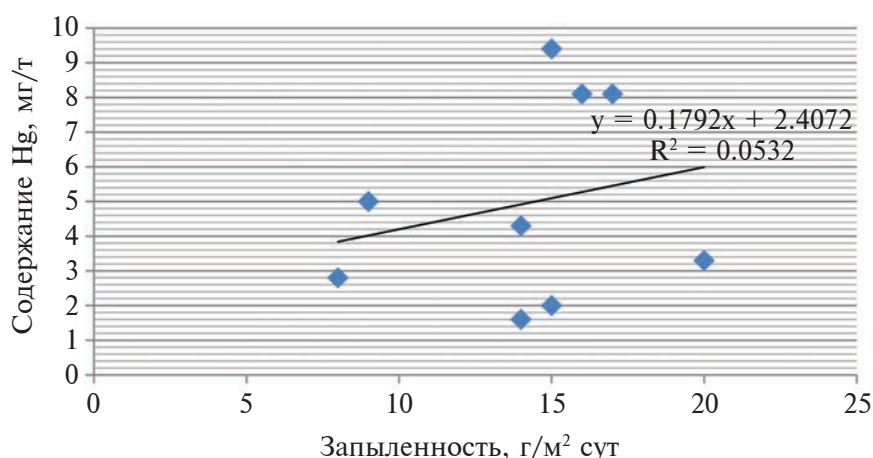


Рис. 3. Зависимость содержания Hg во взвешенных веществах приземной атмосферы от запыленности воздуха.

Объем поступления Hg с ВВ из атмосферы на поверхность почвы равен в среднем 0.055 мкг/м²/сут и не представляет опасности загрязнения почвенного покрова. Об этом свидетельствует и несовпадение контуров атмо- и литохимических аномалий Hg на территории города (см. рис. 1 и 2).

Геологическая деятельность человека привела к возникновению нового вида пород – техногенных отложений – культурного слоя (КС). Сведениям о накоплении микроэлементов, главным образом тяжелых металлов и Hg в КС посвящен ряд работ по крупным городам [14, 16, 19, 23]. Между тем, практически отсутствуют данные о геохимических особенностях распределения Hg в КС городов, расположенных в криолитозоне.

Техногенное поступление Hg в городские почвы и грунты КС практически не связано с выпадением из атмосферы и обогащением при преобразовании аллювиальных отложений, так как содержание в атмосфере невысоко, а в аллювиальных отложениях, на которых сформировался почвенный покров, значительно ниже кларкового. Об этом свидетельствует и отрицательное значение коэффициента аэрозольной концентрации [12], указывающее на отсутствие обогащения твердой фазы аэрозоля за счет состава исходного литогенного материала. Концентрация Hg в талых и мерзлых грунтах КС значительно выше, чем в городских почвах.

Впервые характеристика КС в криолитозоне была дана Н.И. Салтыковым в статье “О фундаментах зданий г. Якутска”. Мощность этого слоя, состоящего “...из перегноя, строительного мусора и отбросов, накопившихся в течение трехсотлетнего существования города и перемешавшихся с естественным пылевато-суглинистым покровом, ... меняется в связи с возрастом отдельных участков города. Наибольшей величины (до 1.50–1.75 м) она достигает в районе ... заселенном уже в конце XVII в.” [17, с. 102]. Интересно, что “... в “культурном”

слое, обильном перегноем, надмерзлотные воды города содержат в значительном количестве примеси солей Cl, SO₄ и других, которые иногда остаются в жидком состоянии до температуры минус 3°–4°С” [там же, с. 103].

Техногенные отложения на территории г. Якутск многокомпонентны. Это природные аллювиальные образования, перемещенные при городском строительстве, и отбросы различного происхождения: производственные и строительные отходы, обычный бытовой мусор и т.п. Характерными для КС центральных улиц города являются захороненные остатки торцовой мостовой из деревянных листовенных чурбаков, установленных на слой привозного песка, толщиной около 0.5 м.

Условия формирования КС на территории Якутска весьма специфичны, его верхняя часть – это арена ежегодного проявления процессов сезонного промерзания и оттаивания грунтов и существования надмерзлотных вод. Неотъемлемой частью строения техногенных отложений, преимущественно в старой части города, являются подземные льды (лед-цемент, ледяные прослой, линзы, жилы).

Наличие многолетнемерзлых пород определяет геодинамическую и геохимическую устойчивость толщи техногенных осадков, различающихся химическим и минеральным составом, строением, физико-механическими свойствами и особенно степенью миграции химических элементов.

Мощность КС в Якутске изменяется от центра города к окраинам. Средняя мощность отложений в старых районах города около 4 м, а в “молодых” на окраинах – менее 2.5 м.

В результате более чем трехвекового освоения городской территории в Якутске сформировалась локальная биотехносфера. Формирование литологических и геохимических параметров КС в городе происходило в два исторических этапа.

Первый – “деревенский”, возрастом более 300 лет, с начала застройки территории (1642 г.) и до середины 1950-х гг. В этот период формирование КС обуславливалось содержанием большого числа лошадей и коров, печным отоплением, отсутствием канализации, что отразилось на накоплении органического вещества. В условиях криолитозоны в анаэробной среде органическое вещество в КС очень хорошо сохраняется (выгребные ямы, навоз). Специфический гнилостный запах чувствуется при оттаивании мерзлых грунтов КС обычно на глубине 2–4 м, иногда до 6–8 м. Характерно существенное накопление в мерзлых грунтах КС нитратов (0.027–0.071 мг-экв), указывающее на присутствие “старой” органики, в то время как в сезонноталых грунтах КС содержание NO_3^- на порядок меньше и составляет всего 0.003 мг-экв.

Второй этап – “городской”, охватывает последние 70–80 лет, когда изменился характер хозяйственной жизни города, и сформировалась собственно урбанизированная территория: высотная застройка, канализация, транспорт, энергетика, промышленность.

Геохимическая характеристика отложений КС получена автором в результате многолетнего площадного литохимического мониторинга городских почв и изучения керна буровых скважин. Районы Якутска различаются возрастом городской застройки, а, следовательно, и продолжительностью техногенного воздействия. Буровые профили пройдены в районах города с различным временем освоения. Их сопоставление позволяет судить о химическом составе и содержании Hg в КС в каждом участке урбанизации. (рис. 4).

В “деревенский” и “городской” этапы формирования КС характер источников поступления Hg в грунты различался, но основными были хозяйственная деятельность жителей города и непосредственное внесение загрязнителей в почво-грунты в твердой и жидкой фазах.

В “деревенский” период Якутск представлял собой большую деревню. “Значительная часть жителей г. Якутска содержала конный и рогатый скот. Чуть ли не в каждом дворе заметите хлева для рогатого скота, загоны и конюшни для лошадей, огороды и т.д.” [13, с. 102]. “В XIX столетии ... крупными владельцами домашнего скота были купцы ...: у Феофана Соловьёва содержалось 150 лошадей, 10 быков и 20 коров, у Федота Соловьёва – 100 лошадей, у Захарова Андрея было 70 лошадей, 30 кобылиц, 15 быков, 85 коров. ... В г. Якутск на убой пригонялось скота ежегодно до 3 тыс. голов” [там же, стр. 105]. В этот период основным источником поступления Hg в литогенную среду было биологическое накопление Hg в органических объектах жизнедеятельности домашних животных и человека. По возрастающей степени аккумуляции ртути млекопитающие

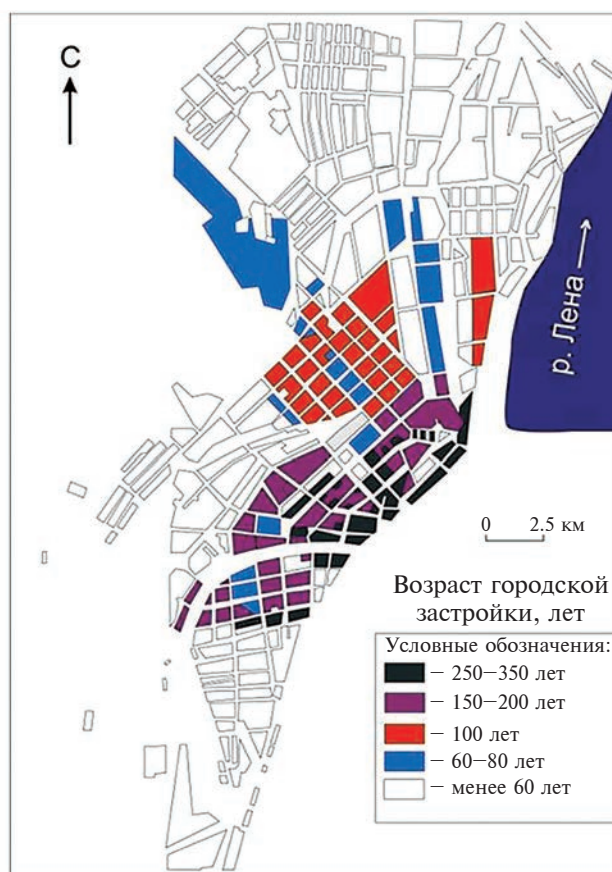


Рис. 4. Возраст городской застройки Якутска (составлен по планам и картам города с XVIII в. и по настоящее время).

Таблица 4. Содержание Hg в экскрементах животных и птиц, мг/т [8]

Объект исследования	На участках аномалий	На контрольных участках
Бараний навоз	936	20
Конский навоз	3137	70
Коровий навоз	2720	70
Куриный помёт	3790	110

приоритетны в ряду организмов: растения < насекомые < почвенные микроорганизмы < травоядные млекопитающие < хищные млекопитающие < макромицеты [6].

По данным Я.В. Зачиняева [8], среднее содержание Hg в экскрементах сельскохозяйственных животных колеблется от 20 до 110 мг/т, а на участках аномалий достигает 2000–3000 мг/т (табл. 4).

Среднее содержание Hg в грунтах КС “деревенского” периода, возраст которых более 100 лет, колеблется в пределах 50–100 мг/т, что вполне

Таблица 5. Поступление Hg в окружающую среду Якутска за счет бытовых термометров

Год	1970	1980	1990	2000	2010	2020
Население, тыс. чел.	108	157	192	195	270	323
Поступление Hg за счет термометров, кг	13.4	19.5	23.8	24.2	33.5	40.0

Таблица 6. Среднее содержание Hg в компонентах зоны гипергенеза Якутска, мг/т

Компоненты зоны гипергенеза				
Атмосфера, ВВ (лето)	Почвы	Грунты КС		Q _{ал}
		сезонноталые, КС _{СТС}	мерзлые, КС _{МП}	
13	12.8	140	42	28

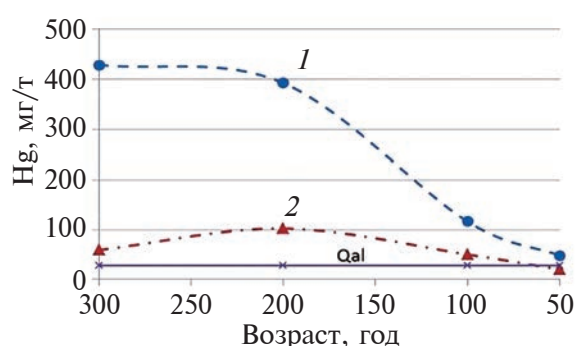


Рис. 5. Зависимость концентрации ртути в сезонноталых (1) и мерзлых (2) грунтах КС от продолжительности техногенного воздействия.

сопоставимо с данными Я.В. Зачиняева [8] о биофильном накоплении Hg.

В “городской” этап формирования КС поступление Hg в грунты определялось воздействием урбанизации, в первую очередь сжиганием органического топлива: природного газа, а также угля, дров, накоплением ртутьсодержащих ламп, различных приборов, обычных градусников, ртутных термометров для измерения температуры тела. Широкое использование ртутных термометров в быту, медицине, сельском хозяйстве, промышленности и в других сферах человеческой деятельности является одним из существенных источников поступления ртути в среду обитания.

По расчетам Е.П. Янина [20], ежегодно из строя выходит 1 ртутный термометр на 16 жителей. Отсюда следует, что в последние годы ежегодно в Якутске используются (выходят из строя, разбираются и т.д.) порядка 20 тыс. ртутных термометров, в которых содержится около 40 кг Hg. Из этого количества примерно 3–4 кг в той или иной мере утилизируются на специальных предприятиях, а остальная Hg, около 37 кг, поступает, главным образом на свалки отходов и в канализацию, в конечном счете рассеиваясь в окружающей

среде. По нашей оценке, за последние 50 лет количество техногенной Hg, попадающей в городскую окружающую среду только за счет бытовых термометров, составляло от 13 до 40 кг (табл. 5).

По данным [22], загрязнение окружающей среды бытовыми термометрами составляет 2/3 всего количества Hg, поступающей с бытовыми отходами. Ориентировочно можно считать, что в почвы и поверхностные воды города в последние годы ежегодно привносится около 50 кг этого токсичного металла.

Мерзлые (КС_{МП}) и сезонноталые (КС_{СТС}) грунты культурного слоя близки по химическому составу к поровым растворам – это слабощелочные, смешанные по составу катионов и анионов растворы с незначительным преобладанием гидрокарбонатов и натрия. Верхние горизонты культурного слоя (КС_{СТС}) отличаются большей соленостью (D_{sal} = 0.096%). В нижнем горизонте (КС_{МП}) величина солености понижается до D_{sal} = 0.078%.

Техногенные геохимические аномалии в сезонноталых и мерзлых грунтах КС Якутска различаются по уровню концентрации Hg. Верхние горизонты КС_{СТС} отличаются максимальным среди компонентов зоны гипергенеза содержанием Hg, в среднем 140 мг/т. В нижележащих КС_{МП} среднее содержание Hg понижается до 42 мг/т (табл. 6).

Дефицит Hg на поверхности (в почвах), по сравнению с грунтами КС связан с процессами криогенного перераспределения загрязняющих веществ, когда в зимний период происходит миграция в более глубокие горизонты сезонноталого слоя. Понижение концентрации макро- и микрокомпонентов в почвах за зимнее время за счет этих процессов, а, следовательно, и глубинный перенос подвижных форм компонентов, могут составить для HCO₃⁻, Cu и Hg 60–80%, Cl⁻, Sn и Na⁺ – 20–40% [10]. Контрастность аномалий Hg в грунтах КС по сравнению с содержанием в аллювиальных отложениях составляет в КС_{СТС} – 5, а в КС_{МП} – 1.5. Содержание Hg в КС_{МП} в 3 раз

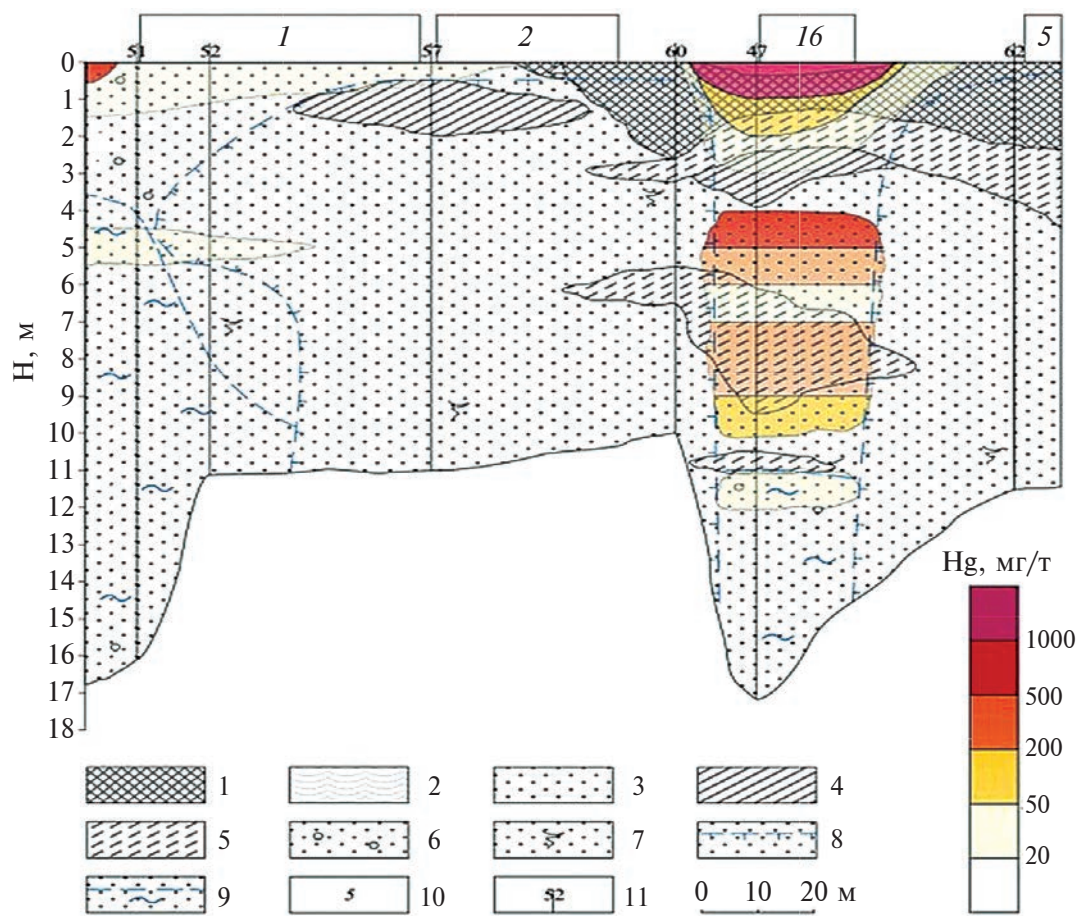


Рис. 6. Литохимические аномалии Hg в грунтах талика, мг/т. 1 – грунт насыпной; 2 – почвенно-растительный слой; 3 – песок; 4 – суглинок; 5 – супесь; 6 – песок с галькой; 7 – песок с органикой; 8 – граница мерзлых пород; 9 – водоносный горизонт; 10 – здания и сооружения ЯТЭЦ; 1 – главный корпус, 2 – здание водогрейных котлов, 5 – углекислотный цех, 16 – химводоочистка; 11 – номер буровой скважины.

меньше, чем в KC_{CTC} (см. табл. 5), что может быть связано не только с различной интенсивностью техногенеза, но и со снижением миграционной способности Hg при постоянно отрицательной температуре мерзлых грунтов.

Максимальная контрастность техногенных геохимических аномалий ($KK \geq 5$) в грунтах КС по сравнению с аллювиальными отложениями свойственна хлоридам, соединениям азота и Hg (в скобках коэффициент контрастности): Cl^- (29), NO_3^- (18), K^+ (16), Na^+ (14), NO_2^- (12), SO_4^{2-} и Hg (5). Этот ряд отражает специфику техногенного воздействия, которая определяется засолением и внесением органики в почвы и грунты КС.

Техногенное, преимущественно хлоридное, засоление и контрастные аномалии Hg и макро- и микроэлементов в старых районах города охватывают полностью породы КС (KC_{CTC} и $KC_{МП}$) и иногда проникают в постилающие их верхние горизонты аллювиальных отложений.

Наблюдается зависимость мощности техногенных геохимических ореолов Hg в грунтах

КС от возраста освоения городской территории. В старых районах города, где продолжительность техногенного воздействия превышает 200 лет, мощность геохимических аномалий Hg достигает 8–10 м, в более молодых, 100-летних – до 3–5 м, в районах современной застройки не превышает 0.5–1 м.

С продолжительностью техногенного воздействия связано и возрастание концентрации Hg в грунтах КС (рис. 5). Наиболее ярко проявляется эта зависимость в сезоннотальных слоях KC_{CTC} , наиболее доступных загрязнению. В самых старых 200–350-летних грунтах KC_{CTC} средняя концентрация Hg около 400 мг/т, в 3–7 раза выше, чем в более молодых столетних, а максимальные значения достигают 2000–5000 мг/т (до 2.5 ПДК).

Ураганные концентрации и формирование контрастных аномалий Hg наблюдаются и в грунтах современных техногенных таликов, где накопление Hg не связано с многолетним загрязнением. Подобная аномалия Hg сформировалась в песках и супесях техногенного несквозного талика на территории Якутской тепловой

электростанции (ЯТЭЦ). Главной причиной изменения теплового состояния грунтов и образования водоносных таликов глубиной на локальных участках до 25 м являются аварийные утечки воды из водонесущих коммуникаций. При этом температура грунтов увеличивается на десятки градусов с образованием техногенного талика. На большей части территории ЯТЭЦ грунты находятся в многолетнемерзлом состоянии, а участки локальных таликов занимают не более 20%. Мощность слоя сезонного промерзания в зависимости от степени растепления грунтов изменяется от 2 до 4 м, а глубина сезонного протаивания – от 1.5 до 4.5 м [7].

Формирование ртутной аномалии на территории ЯТЭЦ обусловлено сбросами высокоминерализованных промышленных вод кожевенного завода (1930–1960 гг.) по галерее, проложенной по территории электростанции, а также загрязнением при использовании на электростанции угля в 1936–1967 гг. Распределение Hg в мерзлых грунтах в основании электростанции равномерно по разрезу и не превышает 20 мг/т. Аномалия Hg сформировалась только в талых грунтах до глубины 12 м, и концентрация Hg постепенно снижается: на глубине 1 м – 3170, 4–5 м – 500–100, 12 м – 20–50 мг/т (рис. 6).

Санация экологически опасных ртутных аномалий на территории города может быть выполнена методами экскавации загрязненных почвогрунтов с их последующей переработкой или физическим с последовательным разделением: сепарация, отмучивание, обогащение [21]. Если санация ртутной аномалии на территории старой свалки мусора не представляет значительных усилий, то обнаружение и ликвидация экологически значимых объемов Hg в сезонноталых грунтах КС представляет собой трудную задачу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование КС в г. Якутске происходило в два исторических этапа: “деревенского” – на протяжении более 300 лет, со дня начала застройки территории (1642 г.) и до середины 1950-х гг., и “городского”, когда в последние 70–80 лет сформировалась собственно урбанизированная территория. Исторические, техногенные и геокриологические условия формирования КС в Якутске определили особенности химического и минерального состава, литологического строения, физико-механических свойств толщи и миграции Hg в сезонноталых и мерзлых техногенных отложениях.

Концентрирование Hg в грунтах КС города мало связано с геохимическими свойствами аллювиальных четвертичных отложений и поступлением металла из атмосферы при сжигании природного газа и пылевом загрязнении. Основной

источник загрязнения грунтов КС – ртутьсодержащие отходы хозяйственной деятельности городских жителей.

Возникновение аномалий Hg в грунтах КС возрастом более 100 лет определяется преимущественно биофильным накоплением Hg в органических объектах жизнедеятельности домашних животных и человека.

Контрастные аномалии Hg в старых районах города охватывают полностью сезонноталые и мерзлые грунты КС (до 5–6 м), иногда проникая глубже, в кровлю аллювиальных отложений.

Максимальные содержания Hg наблюдаются в сезонноталых грунтах КС в интервале глубин 1–4 м, с продолжительностью техногенного воздействия более 150 лет. В районах города с меньшим возрастом техногенного воздействия Hg также фиксируется в сезонноталых и мерзлых грунтах КС (до глубины 2–4 м), при средней концентрации 50–120 мг/т, или образует слабоконтрастные аномалии только в почвенно-растительном слое.

В современных условиях ураганные концентрации Hg могут формироваться в техногенных таликах, на участках аномального растепления мерзлых отложений, достаточно быстро – за 1–2 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация / [М.И. Герасимова и др.]. М.: Изд-во: Ойкумена, 2003. 270 с.
2. *Виноградов А.П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571.
3. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Стандартиформ, 2006. 15 с.
4. Государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 г. <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (дата обращения: 15.02.2021).
5. *Григорьев А.А., Будыко М.И.* Классификация климатов СССР // *Изв. АН СССР. Сер. геогр.* 1959. № 3. С. 3–19.
6. *Ермаков В.В.* Биогенная миграция и детоксикация ртути // *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: матер. симп.* (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: GEOХИ РАН, 2010. С. 8–22.
7. *Заболотник С.И., Заболотник П.С.* Динамика температуры грунтов вокруг и под зданием Якутской тепловой электростанции // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX. № 1. С. 70–80.
8. *Зачиняев Я.В.* Ртуть и экологическая безопасность лошадей // *NovaInfo*, 2011. № 4. <https://novainfo.ru/article/527>.
9. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов. Справочник в 6 кн.: Кн. 5: Редкие d-элементы / Под ред. Э.К. Буренкова. М.: Экология, 1997. 576 с.
10. *Макаров В.Н.* Геохимические поля в криолитозоне. Якутск: Изд-во ИМ СО РАН, 1998. 116 с.
11. *Макаров В.Н., Торговкин В.Н.* Геохимия техногенных отложений (культурного слоя) в криолитозоне (на примере г. Якутска) // *Криосфера Земли*. 2018. № 3. С. 27–39.

12. Основы биогеохимии / В.В. Добровольский. М.: Изд. центр "Академия", 2003. 400 с.
13. Попов Г.А. История города Якутска. 1632–1917 гг.: Краткие очерки. Т. III. Якутск: Изд-во Якутский гос. ун-т. 2007. 305 с.
14. Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд За экономическую грамотность, 1997. 310 с.
15. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 449 с.
16. Садовникова Л.К. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами // Биологические науки. 1989. № 9. С. 47–52.
17. Салтыков Н.И. О фундаментах зданий г. Якутска // Тр. Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева. Т. 1. Жилищное и мелкопромышленное строительство в районах распространения вечной мерзлоты. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 102–136.
18. Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на "Якутском разбеге" // Геоморфология. 2008. № 1. С. 87–94. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-87-94>
19. Экология города / Отв. ред. Н.С. Касимов. М.: Научный мир, 2004. 624 с.
20. Янин Е.П. Экологические аспекты производства, использования и утилизации ртутных термометров в России // Экологическая экспертиза. 2004. № 6. С. 2–36.
21. Янин Е.П. Технологии очистки ртутьсодержащих почв и грунтов (зарубежный опыт) // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: матер. Междунар. симп. (Москва, 7–9 сентября 2010 г.). М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 469–471.
22. ACAP. Assessment of Mercury Releases from the Russian Federation. Prepared for the Arctic Council by the Russian Federal service for Environmental, Technological and Atomic Supervision and the Danish Environmental Protection Agency, 2005. 344 с.
23. Clarkson T.W. Mercury: Major Issues in Environmental Health // Environmental Health Perspectives. 1993. V. 100. P. 31–38.
24. Fisher J.A., Jacob D.J., Soerensen A.L. et al. Factors driving mercury variability in the 14 Arctic atmosphere and ocean over the past 30 years // Global Biogeochem. Cycles. 2013. V. 27. P. 1226–1235.
25. Tchounwou P.B. et al. Review: environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public // Environmental Toxicology. 2003. V. 18. № 1. P. 149–175.

MERCURY IN THE URBAN AREA ENVIRONMENT IN THE CRYOLITHOZONE

V. N. Makarov^{a, #}

^aMelnikov Permafrost Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences

ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010 Russia

[#]E-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

The geochemical features of mercury migration in the environment of a city located in the permafrost zone are considered. The average Hg content in suspended matter in the surface atmosphere ranges from 0.11–0.22 in winter to 13–14 mg/t in summer. The total annual intake of Hg from explosives from the atmosphere to the surface is estimated at 11 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$, 99% of which occurs in the warm season. Analysis of lithochemical surveys in the city showed that the average Hg content in urban soils varies within the range of 6–22 mg/t. The presence of a seasonally thawed layer, frozen and permafrost rocks determines the binary structure of the cultural layer and the contrasting distribution of Hg in soils. It has been established that the abnormal Hg concentrations in the soils of cultural layer are mainly due to the intake of pollutants in the solid and liquid phases and, to a lesser extent, by the intake from the atmosphere and the chemical composition of the alluvial substrate. The occurrence of Hg anomalies in soils of a cultural layer older than 100 years is determined primarily by the biophilic accumulation of Hg in organic objects of vital activity of domestic animals and humans. Maximum Hg contents of up to 2000–5000 mg/t are observed in seasonally thawed soils in the depth range of 1–4 m, with a technogenic impact lasting more than 150 years. In the urban areas with less lasting technogenic impact, Hg is also fixed in seasonally thawed and frozen soils, with an average concentration of 50–120 mg/t, or forms low-contrast anomalies only in the soil-vegetation layer.

Keywords: atmosphere, suspended substances, soils, soils, cultural layer, permafrost zone, urbanization, mercury

REFERENCES

1. [Anthropogenic soils: genesis, geography, and reclamation]. M.I. Gerasimova et al. Eds. Moscow, Oikumena Publ., 2003, 270 p. (in Russian)
2. Vinogradov, A.P. [Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks in the Earth's crust]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russian)
3. GN 2.1.7.2041-06. [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in soil. Hygienic standards]. Moscow, Standartinform Publ., 2006, 15 p. (in Russian)
4. [State report on the environmental situation in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2019]. <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (accessed 02.15.2021). (in Russian)
5. Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. [Climate classification in the USSR]. *Izvestiya AN SSSR, Ser.geogr.*, 1959, no. 3, pp. 3–19. (in Russian)
6. Ermakov, V.V. [Biogenic migration and detoxification of mercury]. In: [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Proc. of the Int. Symp., Moscow, September 7–9, 2010]. Moscow, GEOKhI RAS, 2010, pp. 8–22. (in Russian)
7. Zabolotnik, S.I., Zabolotnik, P.S. [Dynamics of soil temperature around and under the building of the Yakut thermal power plant]. *Kriosfera Zemli*, 2016, vol. XX, no. 1, pp. 70–80. (in Russian)
8. Zachinyaev, Ya.V. [Mercury and environmental safety of horses]. *NovaInfo*, 2011, no. 4. <https://novainfo.ru/article/527> (accessed: 05/25/2022). (in Russian)

9. Ivanov, V.V. [Ecological geochemistry of elements]. Guidebook in 6 volumes. Book 5. [Rare d-elements]. E.K. Burenkova, Ed. Moscow, Ekologiya Publ., 1997, 576 p. (in Russian)
10. Makarov, V.N. [Geochemical fields in the cryolithozone]. Yakutsk, IM SO RAN Publ., 1998, 116 p. (in Russian)
11. Makarov, V.N., Torgovkin, V.N. [Geochemistry of technogenic deposits (the cultural layer) in the permafrost zone (by the example of Yakutsk)]. *Kriosfera Zemli*, 2018, no. 3, pp. 27–39. (in Russian)
12. [Fundamentals of biogeochemistry]. V.V. Dobrovolskii, Ed. Moscow, Publ. Center “Academy”, 2003, 400 p. (in Russian)
13. Popov, G.A. [History of Yakutsk.1632–1917: Brief essays]. Volume III. Yakutsk, Yakutsk State University Publ., 2007, 305 p. (in Russian)
14. [Soil, city, ecology]. G.V. Dobrovolskii, Ed. Moscow, Foundation for Economic Literacy, 1997, 310 p. (in Russian)
15. [Air Pollution Control Guidelines]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979, 449 p. (in Russian)
16. Sadovnikova, L.K. [Ecological consequences of soil pollution with heavy metals]. *Biologicheskie nauki*, 1989, no. 9, pp. 47–52. (in Russian)
17. Saltykov, N.I. [On the foundations of buildings in Yakutsk]. In: [Proc. of the Obruchev Institute of Permafrost Studies. Vol. 1. Housing and small-scale industrial construction in permafrost areas]. Moscow–Leningrad, AN SSSR Publ., 1946, pp. 102–136. (in Russian)
18. Spektor, V.V., Bakulina, N.T., Spektor, V.B. [Relief and age of the alluvial cover in the Lena River valley Lena within “Yakutskii razboi”]. *Geomorfologiya*, 2008, no. 1, pp. 87–94. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-87-94>. (in Russian)
19. [Ecology of the city]. N.S. Kasimov, Ed. Moscow, Nauchymir Publ., 2004, 624 p.
20. Yanin, E.P. [Environmental aspects of the production, use and disposal of mercury thermometers in Russia]. *Ekologicheskaya ekspertiza*, 2004, no. 6, pp 2–36. (in Russian)
21. Yanin, E.P. [Technologies for purification of mercury-containing soils and rocks (foreign experience)]. In: [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects. Proc. of the Int. Symp. Moscow, September 7–9, 2010]. Moscow, GEOKhI RAS, 2010, pp 469–471. (in Russian)
22. ACAP. Assessment of mercury releases from the Russian Federation. Prepared for the Arctic Council by the Russian Federal service for environmental, technological and atomic supervision and the Danish Environmental Protection Agency, 2005, 344 p.
23. Clarkson, T.W. Mercury: Major Issues in Environmental Health, *Environmental Health Perspectives*, vol. 100, 1993, pp. 31–38.
24. Fisher, J.A., Jacob D.J., Soerensen A.L., et al. Factors driving mercury variability in the 14 Arctic atmosphere and ocean over the past 30 years, *Global Biogeochem. Cycles*, 2013, vol. 27, pp. 1226–1235.
25. Tchounwou, P.B., Ayensu, W.K., Ninashvili, N., et al. Review: environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public health. *Environmental Toxicology*, 2003, vol. 18. no. 1, pp. 149–175.

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 550.34.013.4:550.34.013.2

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА К КОДУ FEEFLOW ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАКАЧКИ РАССОЛОВ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ПОРОДЫ

© 2024 г. И. А. Расторгуев^{1,2,*}, И. В. Литвинова^{2,**}, Н. А. Иост², А. В. Ильин²

¹НИЦ “Курчатовский Институт”, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123098 Россия

²АК “Алроса”, ул. Советская, 5, Новосибирск, 630007 Россия

*E-mail: stiar@mail.ru

**E-mail: LitvinovaIV@alrosa.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 24.11.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

На момент написания статьи не существует готовых программных кодов для расчета процессов тепломассопереноса и фильтрации в многолетнемерзлых породах (ММП). Существующие программы не решают задачи растепления (плавления) льда при растворении закачанными рассолами. В статье предлагается решение такой задачи, с использованием нового кода (FreezeThaw75), разработанного одним из авторов для расчета тепло- и массопереноса с учетом фазовых переходов вода–лед и лед–вода–вода. Модуль FreezeThaw75 разработан на C++ применительно к модельной среде Feflow v7.4-7.5. Проведена верификация работы модуля – сравнение расчетов с аналитическим решением и другими программными кодами. Показана функциональность модуля при апробации на модели закачки рассола в мерзлые породы на одном из участков закачки в Далдыно-Алакитском районе Якутии. Особенностью расчетов в созданной модели является учет больших закачиваемых объемов высокоминерализованных рассолов (с минерализацией до 400 г/л). При взаимодействии с породами рассолы способствуют деградации льдистой составляющей ММП. При проектировании полигона закачки учитывают криогидрогеологические условия участка. Закачка производится в толщу ММП с высокой поглощающей способностью, особенно в районах, приуроченных к зонам тектонических нарушений. Разработанный модуль позволяет корректировать прогнозируемый потенциал эксплуатируемых участков закачки, а также может использоваться в качестве дополнительного элемента контроля процесса закачки и формирования техногенного водоносного горизонта в толще ММП.

Ключевые слова: *тепломассоперенос, модуль FreezeThaw75, фазовые переходы, Далдыно-Алакитский район, фильтрационная модель, многолетнемерзлые породы, высокоминерализованные рассолы, коэффициент фильтрации, C++*

DOI: 10.31857/S0869780924020055; EDN: DZQFAP

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент времени ведется разработка программных продуктов, позволяющих решать задачи геофильтрации в многолетнемерзлых породах (ММП). Как правило, эти коды учитывают процессы теплопереноса без массопереноса. Обзор этих разработок дан в статье [1]. Расчеты фильтрации с учетом тепломассопереноса в ММП опубликованы в работах российских специалистов [7–9]. Эти работы рассматривают одномерные условия фильтрационного потока.

В стандартной версии программной среды DHI Feflow нет возможности моделирования

многомерного тепломассопереноса и промерзания с учетом фазовых переходов. Однако возможности Feflow выполнять расчеты фильтрации в области отрицательных температур могут быть расширены с помощью средств программирования, позволяющих разрабатывать дополнительные модули, необходимые пользователю.

Предлагаемый модуль может быть использован при расчете многомерных задач фильтрации и тепломассопереноса. Его особенностью является подключение как внешней библиотеки DLL в среду DHI Feflow [13]. Также дорабатывается возможность подключения расчетов в области ММП к кодам MODFLOW.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Существуют различные способы утилизации дренажных вод. Самые распространенные из них — это накопление в искусственных водоемах. Некоторые предприятия обосновывают закачку в глубокие горизонты. Каждая организация, в зависимости от условий эксплуатации, выбирает наиболее экологически безопасный режим утилизации.

Одним из таких способов утилизации дренажных рассолов была выбрана закачка в ММП. Возможность использования криогенных геологических структур и подмерзлотных водоносных горизонтов в криолитозоне для захоронения высокоминерализованных вод с минерализацией до 400 г/л зависит от региональных мерзлотно-гидрогеологических условий. Эти условия определяют зависимость природных резервуаров от фильтрационно-емкостных свойств поглощающего криогенного или водоносного горизонта, а также от мощности и текстурных особенностей перекрывающего мерзлотного экрана [2].

Для закачки дренажных рассолов в криогенные структуры используются преимущественно участки повышенной трещиноватости. Процесс закачки дренажных вод приводит к высвобождению дополнительного объема пустотности в ММП и образованию техногенного водоносного горизонта. Происходит увеличение емкостных показателей пород и их фильтрационной проницаемости [2, 3]. Дополнительные емкостные параметры ММП на участках закачки формируются главным образом в результате фазового перехода воды из твердого состояния в жидкое при плавлении льда рассолами. Естественная (открытая) пустотность мерзлого массива низкая и не превышает первых процентов от общей потенциальной емкости резервуара.

Как показывает практика и многолетний положительный опыт на разных месторождениях, использование таких участков для удаления дренажных вод — реализованное направление [1–6].

В связи с активной разработкой территории, получением нового материала за последние 20 лет и увеличением объемов закачки, возникает необходимость систематизации и анализа накопленных данных. Эти работы требуют проведения компьютерных расчетов пластовых процессов и создания численных моделей геофильтрации для реконструкции изменений условий эксплуатации объекта разработки.

Созданные модели должны способствовать выбору экономически целесообразного варианта эксплуатации, который позволит обеспечить разумное вложение средств при экономически допустимых затратах.

МЕТОДИКА

Влияние промерзания на проницаемость

В решении задач, когда необходимо учитывать движение потока подземных вод, важен учет влияния промерзания на проницаемость коллектора. Основная идея учета влияния промерзания на проницаемость грунтов заключается в том, что при достижении температур ниже температуры замерзания воды происходит уменьшение значений коэффициентов фильтрации. Так, в работе [2] предлагается постепенное изменение проницаемости при переходе температуры через ноль. Степень перехода в этих статьях предлагается равной уменьшению коэффициентов фильтрации на несколько порядков. В предлагаемой нами модели, реализованной с помощью модуля FreezeThaw75, переход от талого состояния грунта к мерзлоте осуществляется для случая, когда все узлы элементарной ячейки модели имеют температуру ниже температуры замерзания.

Сложность задачи заключалась в том, что в программе FEFLOW отсутствовала возможность учета промерзания и изменения теплофизических свойств грунтов в результате этого. Однако такая возможность была реализована в отдельном программном коде на C++ с использованием API функций библиотеки IFM FEFLOW и включена в модель в среде FEFLOW в виде динамически подключаемого модуля FreezeThaw75. Это позволило учесть переход от талого состояния к мерзлоте при переменной влагонасыщенности.

Основные уравнения

Разработанный модуль позволяет проводить расчеты на основе решения замкнутой системы уравнений фильтрации и теплопереноса.

Предполагая насыщенно-ненасыщенные условия и наличие фазовых переходов, фильтрация подземных вод рассчитывается с помощью (1):

$$Q_f = \nabla(\vec{q}) + n \frac{\partial(s_w)}{\partial t} + s_w S_o \frac{\partial(h)}{\partial t}. \quad (1)$$

Теплоперенос, распределение температур и теплота плавления льда учитываются в подземной среде и вычисляются на основе (2):

$$\nabla(\lambda \nabla T) - C_w \nabla \vec{q} T + Q_h = C_a \frac{\partial T}{\partial t} + L_i \frac{\partial \theta_w}{\partial t}. \quad (2)$$

Влагонасыщенность в зависимости от температуры (3) задается с помощью эмпирического уравнения [12]:

$$s_w = (1 - s_{wres}) e^{(-T/W)^2} + s_{wres}. \quad (3)$$

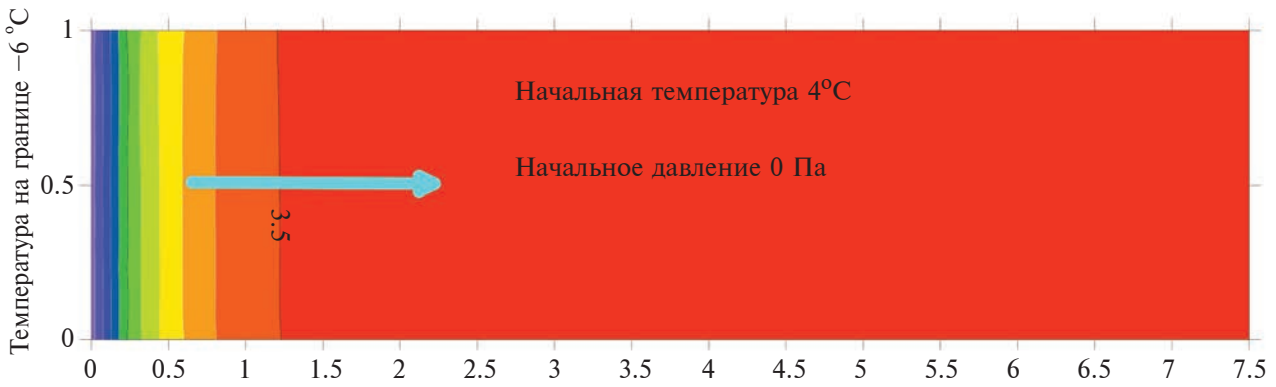


Рис. 1. Постановка задачи Лунардини.

Массоперенос оценивается следующим образом (4):

$$\theta_w \nabla(D\nabla C) - \nabla \vec{q}C + Q_t = \frac{\partial(\theta_w C)}{\partial t}. \quad (4)$$

Вариант вычисления относительной проницаемости в зависимости от влагонасыщенности (5):

$$K_{rw} = 10^{-\Omega(1-s_w)^n}. \quad (5)$$

Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости для твердой фазы, учитывающие льдистость, вычисляются по (6):

$$\lambda = n \cdot s_w \lambda_w + n(1 - s_w) \lambda_i + (1 - n) \lambda_s,$$

$$C_a = n \cdot s_w \rho_w C_w + n(1 - s_w) \rho_i C_i + (1 - n) \rho_s C_s. \quad (6)$$

В уравнениях (1)–(6):

$$q = -K_{rw} K \nabla \left(\frac{\rho_w}{\mu} \left(\vec{h} + \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w} \right) \right) g -$$

скорость Дарси, [м/сут]; n – пористость, [д.е.]; h – напор, [м]; T – температура, [К]; ρ_0, ρ_w – плотности для пресной воды и воды в зависимости от концентрации солей, [кг/м³]; ρ_i, ρ_s – плотности для льда и породы, [кг/м³]; g – ускорение силы тяжести, [м/с²]; $S_w = \theta_w/n$ – влагонасыщенность, [д.е.]; θ_w – объемная влажность, [д.е.]; S_{wres} – остаточная влагонасыщенность, [д.е.]; S_o – удельная упругоёмкость, [1/м]; μ – динамическая вязкость жидкой фазы, [Па с]; L_i – удельная теплота плавления льда, [Дж/кг]; C – концентрация солей в жидкой фазе, [мг/л]; D – тензор гидродинамической дисперсии, [м²/сут]; Ω – показатель сопротивления, д.е.; W – эмпирический параметр, задающий интервал фазового перехода между твердым и талым состояниями воды, [К]; K_{rw}, K – относительная проницаемость и собственная проницаемость породы, соответственно

[д.е.], [м²]; $\lambda_w, \lambda_i, \lambda_s$ – коэффициент теплопроводности воды, льда и породы, [Вт/м/К]; C_w, C_a, C_i, C_s – теплоемкость воды, твердой фазы, льда, породы, [Дж/м/К]; Для проверки достоверности результатов, полученных с помощью разработанного программного средства, были выполнены тестовые расчеты, результаты которых приведены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Промерзание при отсутствии фильтрационного потока

Для постановки данных условий учитываются фазовые переходы в насыщенной пористой среде при отсутствии гидродинамического потока. Для таких условий имеется аналитическое решение Лунардини [11].

На рис. 1 приведена постановка этой задачи. Изначально в горизонтальной модельной области задана температура +4°C. На левой границе задана постоянная температура –6°C, приводящая к постепенному промерзанию. В аналитической модели оцениваются термодинамическое влияние левой границы и распространение промерзания во времени. На рис. 2 приведено сопоставление расчетов на основе модуля FreezeThaw75 с аналитическим решением на момент времени 1 сут.

Промерзание при наличии фильтрационного потока

Такая модельная задача была предложена при разработке программы SUTRA [10, 11]. Двумерная напорная фильтрация решается в прямоугольной области размером 10 м по вертикали и 50 м по горизонтали при наличии слабопроницаемой стены в грунте с постоянной температурой ниже точки замерзания воды и являющейся преградой

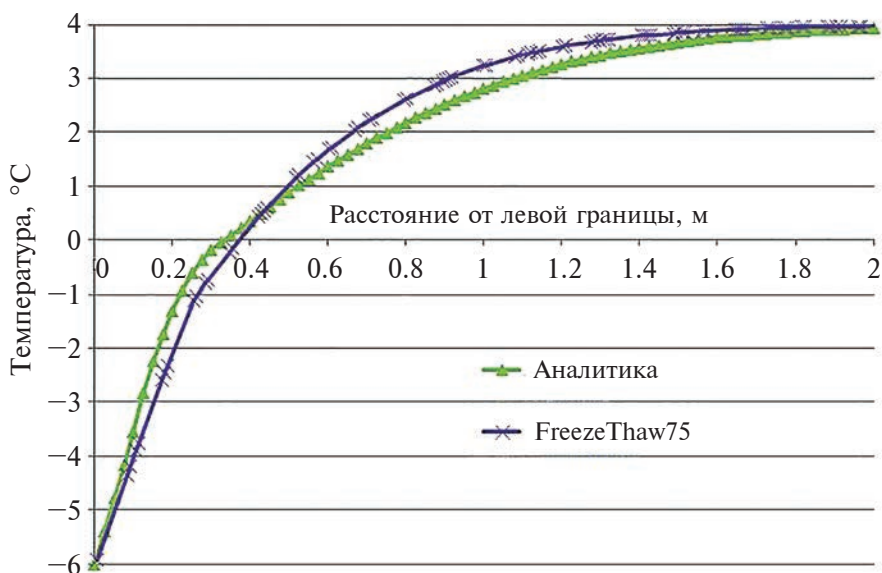


Рис. 2. Сопоставление аналитического расчета и расчета с помощью модуля FreezeThaw75.

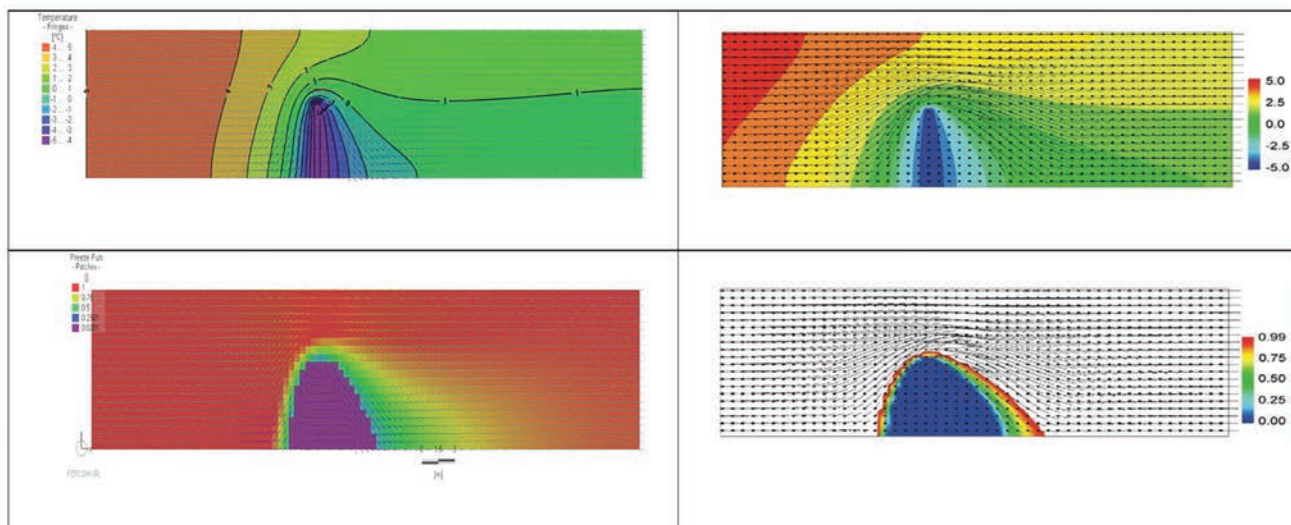


Рис. 3. Сопоставление расчетов на модуле FreezeThaw75 (слева) и SUTRA (справа). Верхний ряд – сопоставление по температуре, нижний – по влагонасыщенности.

фильтрационному потоку. Течение жидкости вызвано перепадом давления между левой и правой границей, на которых заданы ГУ1 с постоянным напором и перепадом 0.05 м между ними. Постоянная температура на левой границе принимается равной +5°C. Стена в грунте внутри модельной области поддерживается при температуре -5°C. Начальная температура всей модельной области +5°C. Дискретизация – равномерная прямоугольная с шагом 0.5 м. Продолжительность моделирования устанавливается равной 800 сут, в течение которых достигается равновесное состояние. Результаты сопоставления расчетов температур и насыщенностей, выполненных с помощью разработанного модуля и программой SUTRA, показаны на рис. 3. Расхождения можно объяснить

особенностями сеточной аппроксимации каждой из программ.

Тепломассоперенос, фазовые переходы и фильтрационный поток

Для верификации работы модуля на задачах, где учитывается тепломассоперенос и фазовые переходы, было произведено сопоставление с расчетами, проведенными авторами статьи [12]. В статье [12] рассматривалась профильная модель, разработанная в программе FlexPDE. В ней учтена зона ММП небольшой мощности и характерные для нее фильтрационные и температурные условия. Задана толщина сезонно-талого слоя

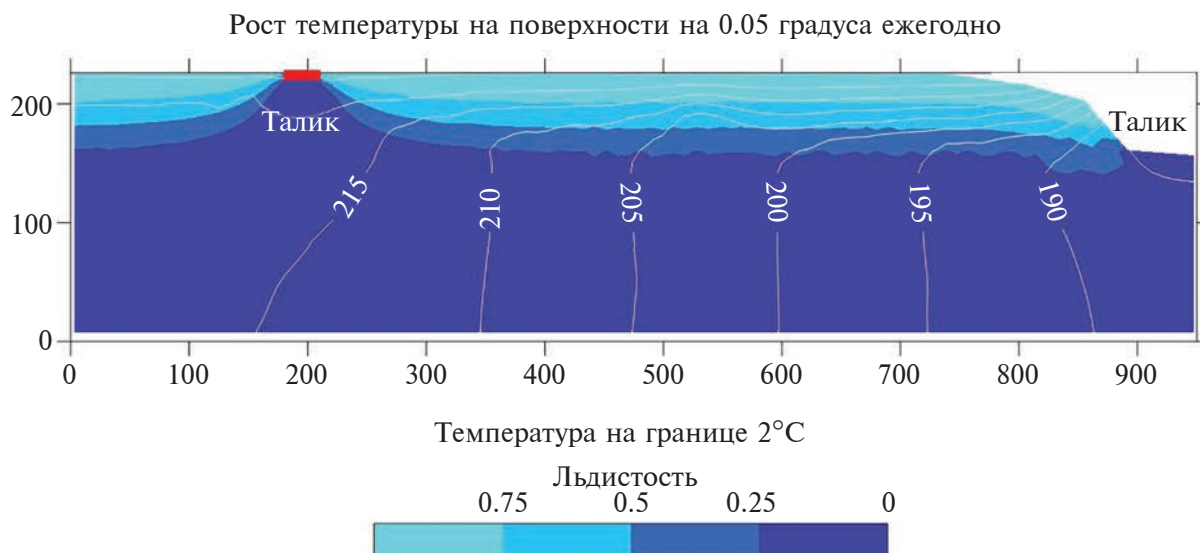


Рис. 4. Начальные и граничные условия для задачи тепломассопереноса. Сине-голубой заливкой показана начальная льди́стость, изолиниями – начальные напоры, красной – начальная концентрация промстоков 100 мг/л.

и талики. Один из таликов образовался за счет утечек муниципальных сточных вод (содержащих в своем составе хлориды), которые разгружаются в другой талик, образованный урезом реки. За счет минерализации снижается температура замерзания, которая изначально равна 0°C для пресной воды. Повышенные концентрации растворенных веществ снижают температуру замерзания поровой воды. Процесс оттаивания, как под действием тепла, так и из-за термоосмотического сдвига за счет растворенных в воде веществ уменьшает содержание льда в ММП и увеличивает их проницаемость.

Рассматриваемая область тестовой модели предполагает начальное распределение уровней согласно рельефу (верхняя граница модели) (рис. 4). Рельеф участка имеет пологий уклон к реке на юго-восток. Основание и вертикальные стороны модели представляют собой непроницаемые фильтрационные границы. В основании модели (т.е. ниже подошвы ММП) была задана постоянная температура +2°C. Вертикальные границы непроницаемы для теплопереноса. На верхней границе задано увеличение температуры на дневной поверхности на 0.05°C ежегодно в течение 100 лет. Начальное распределение таликов, уровней и мощности зоны ММП было задано исходя из данных мониторинга. Над таликом на поверхности в левой части задан источник в виде концентрации 100 мг/л.

На рис. 5 приведено сопоставление расчетов тепломассопереноса с помощью модуля FreezeThaw75 и результатов расчета из статьи [12].

Расчеты выполнены при одинаковых условиях по фильтрации, тепло- и массопереносу. В качестве мигрирующего компонента рассматривается

сценарий миграции хлоридов с максимальной концентрацией 100 мг/л. Если вода имеет повышенную минерализацию, то происходит депрессия температуры замерзания, которая может быть оценена следующим образом. Зависимость температуры замерзания T_f (°C) от минерализации C (мг/л) предлагается рассмотреть по следующей зависимости [12]:

$$T_f = \begin{cases} C \geq 50 \text{ мг/л,} & -0.08C + 4 \\ C < 50 \text{ мг/л,} & 0 \end{cases} \quad (7)$$

Различие в расчетах объясняется тем, что в статье [12] используется динамическое адаптивное измельчение сетки. Размеры ячеек и дискретность по вертикали во время моделирования могут варьироваться на несколько порядков.

Результаты моделирования режима закачки крепких рассолов на опытном участке

После верификационных расчетов модуль FreezeThaw75 опробован на одном из участков отведения рассолов в многолетнемерзлые породы в Далдыно-Алакитском районе Якутии.

Для модельного обоснования закачки рассолов применялись два подхода. Первый, наиболее простой, основан только на фильтрационной модели с параметрами, полученными по результатам мониторинга на объекте. Второй, более сложный, предполагает совместное использование модели геофильтрации и тепломассопереноса с фазовыми переходами.

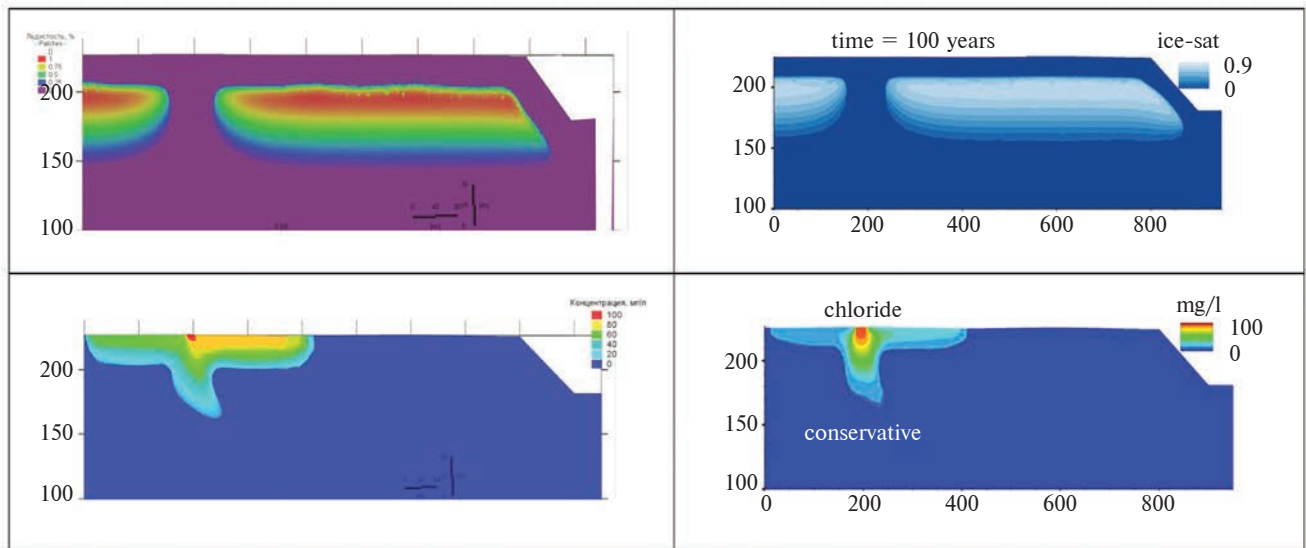


Рис. 5. Сопоставление расчетов тепломассопереноса в FreezeThaw75 (слева) и расчетов из [12] (справа). Сверху льдистость, внизу концентрация хлоридов.

Методы построения фильтрационных моделей

Подход, основанный на использовании только фильтрационных моделей, применялся специалистами различных научно-исследовательских предприятий, а также авторами данной статьи, при этом:

- задавались завышенные фильтрационные и емкостные параметры пород на участках в зоне закачки, не изменяемые из-за плавления льда;

- вне влияния области закачки фильтрационные параметры задавались в несколько раз меньше. Выбор способов уменьшения параметров вне зоны закачки был произвольным.

Опыт построения фильтрационных моделей одного и того же участка на основе различного программного обеспечения показал, что при едином подходе получены расхождения в оценке конечных объемов закачки. Для расчетов использовали ПО Modflow/GMS и FEFLOW. Закачка рассолов осуществлялась в ММП. Калибровка выполнялась в нестационарных условиях.

Использование только фильтрационных расчетов показало, что невозможно точно откалибровать все условия участка и спрогнозировать переполнение закачки, так как не учитываются миграция рассолов, условия криолитозоны и увеличение фильтрационных и емкостных свойств при растворении льда рассолами.

Модель тепломассопереноса для участка закачки

Второй подход при моделировании применялся авторами и заключался в применении расчетов с учетом тепломассопереноса (ТМП) и фазовых

переходов лед–вода и вода–лед. При расчете использовался модуль FreezeThaw75.

В отличие от только фильтрационного подхода, калибровка с учетом тепломассопереноса позволила более точно откалибровать модель. Это было достигнуто за счет изменения проницаемости, пористости, льдистости и параметров теплопроводности.

Моделирование закачки рассолов

В соответствии с зональностью фильтрационных свойств ММП в разрезе и необходимостью учета напоров верхнекембрийского водоносного комплекса (ВВК) в подмерзлотной толще пород, модель разделили на две части: верхняя – ММП, нижняя – ВВК (рис. 6, 7). Начальный уровень свободной поверхности +165 м. По границам заданы непроницаемые граничные условия. Влияние ручьев и инфильтрации на образующийся техногенный водоносный горизонт не учитываются, так как на участке закачки отсутствуют сквозные таликовые зоны.

Объем закачанных рассолов за весь период составил почти 22 млн м³. Для закачки были пробурены 18 скважин: 12 – западного ряда, и 6 – восточного. Заданы расходы в соответствии с режимом закачки на 10-летний период (см. рис. 6). Температура рассолов задавалась постоянной –5°C. Концентрация закачиваемого рассола до 350 г/л. Фоновая концентрация рассолов ВВК рассолов 100 г/л. Фоновая температура массива ММП –2°C. Для минимизации численной дисперсии модельные слои были раздроблены по вертикали.



Рис. 6. Схема расположения объекта моделирования с системой разломов (красные линии). Скважины: закачки – красные кружки, наблюдательные – зеленые; цифры – номера скважин. Линия разреза показана черным цветом.

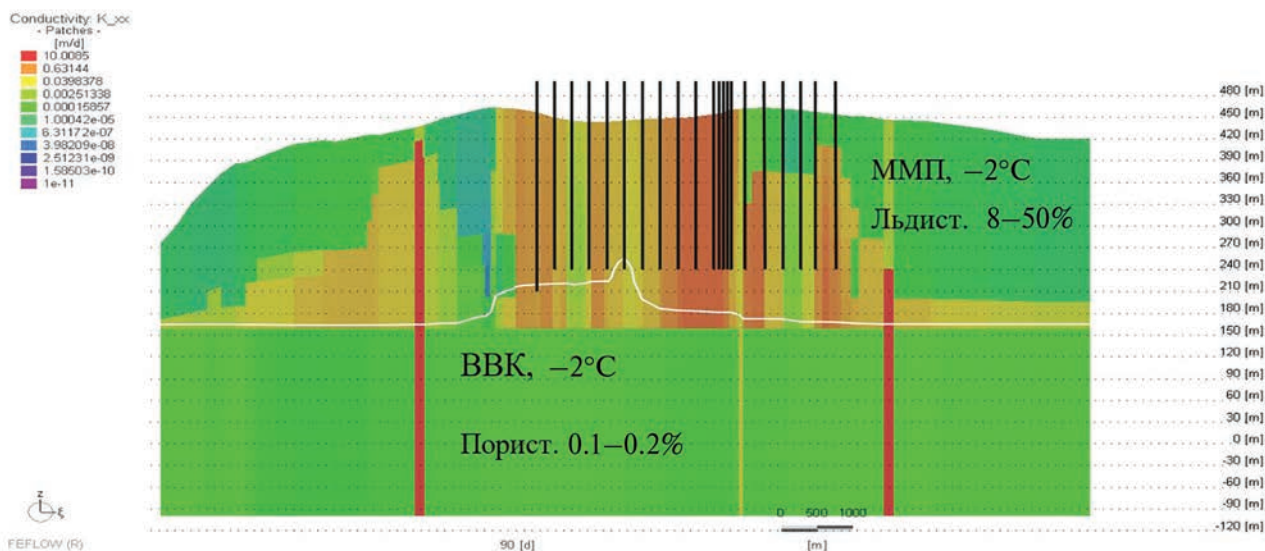


Рис. 7. Схема разреза. Слева – южная часть модели, справа – восточная. Черные линии – скважины, белая линия – кривая репрессии, заливка – коэффициент фильтрации через 3 мес. после начала закачки.

В процессе моделирования выполнялась калибровка параметров. Проводилось сопоставление фактических и расчетных уровней. Сопоставление фактических и расчетных уровней по моделям фильтрации и ТМП показано на рис. 8. Отмечается более качественное совпадение фактических

и расчетных уровней для модели с применением ТМП. Далее этот подход применялся для оценки оставшейся емкости после закачки, и был проведен расчет эксплуатации участка закачки. Результаты расчета показаны на рис. 9.

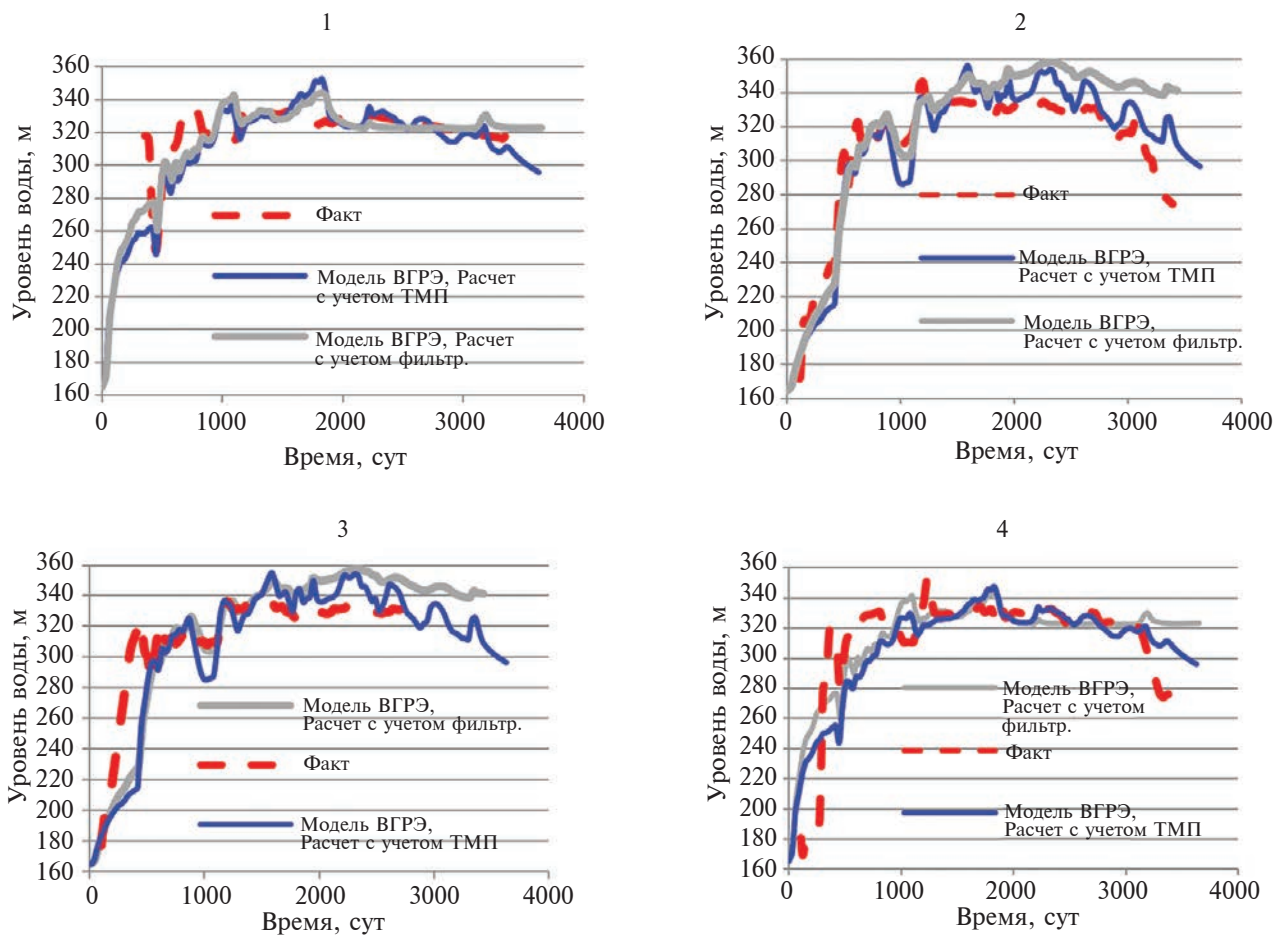


Рис. 8. Сопоставление фактических и расчетных уровней по ближайшим к закачным скважинам пьезометрам №№ 1–4.

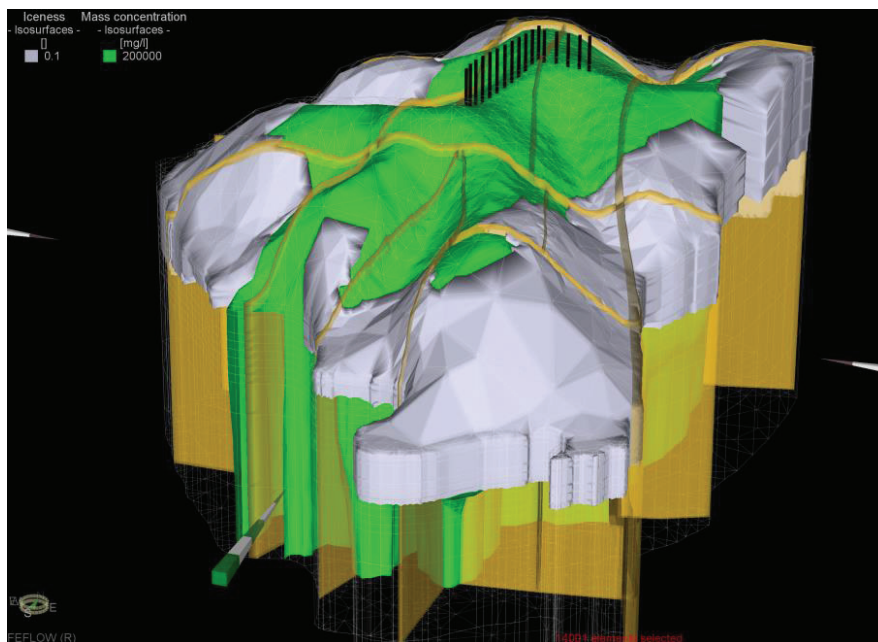


Рис. 9. Результаты расчета закачки в течение 2013–2022 гг. Желтым показаны разломы, зеленым – ореол минерализации 200 г/л, белым – не размороженная часть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный модуль FreezeThaw75 позволяет решать задачи тепломассопереноса и фазовых переходов (лед—вода и вода—лед).

Для проверки достоверности результатов было выполнено сопоставление с:

– аналитическим решением задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов в отсутствии фильтрационного потока;

– численным решением задачи с обтеканием замороженной стены в грунте, полученным с помощью сторонней программы SUTRA;

– численным решением задачи тепломассопереноса с фазовыми переходами и фильтрационным потоком, полученным с помощью кода FlexPDE.

Используя разработанный модуль FreezeThaw75, построена трехпроцессная модель. Модель учитывает тепломассоперенос в зоне ММП с учетом изменения характеристик толщи за счет обводнения закачиваемыми рассолами, растворяющими льдистую составляющую разреза (создание техногенного водоносного горизонта в ММП), и миграции рассолов на участке. Проведенные расчеты с учетом тепломассопереноса показывают текущее заполнение участка с прогнозными рекомендациями дальнейшей эксплуатации участка.

Проведенные расчеты, а также новые подходы с учетом процессов тепломассопереноса и фазовых переходов вода—лед и лед—вода к применяемому в настоящее время моделированию процесса закачки дренажных вод позволяют более реалистично оценивать прогнозный потенциал эксплуатируемых участков закачки, а также могут выступать в качестве дополнительного элемента контроля процесса закачки и развития техногенного водоносного горизонта в толще ММП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольдберг В.М., Скворцов Н.П., Лукьянчикова Л.Г.* Подземное захоронение промышленных сточных вод. М.: Недра, 1994. 282 с.
2. *Дроздов А.В.* Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. 296 с.
3. *Дроздов А.В.* Оценка перспективности участка “Левобережный” для захоронения дренажных рассолов трубки “Удачной” // Изв. Сиб. отд. Секции наук о Земле РАЕН. 2013. № 1(42). С. 146–156.
4. *Дроздов А.В.* Структурно-тектонические критерии оценки приемистости массивов для захоронения сточных вод алмазодобывающих предприятий в криолитозоне Западной Якутии // Криосфера Земли. 2006. Т. X. №2. С. 27–45.
5. *Дроздов А.В., Готовцев С.П.* Особенности миграции рассолов в криолитозоне при их подземном захоронении // Формирование подземных вод криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1992. С. 31–48.
6. *Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В.* Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
7. *Егоров А.Г.* Фильтрационные эффекты в задачах тепломассопереноса и деформирования насыщенных пористых сред: автореф. дис. ... д.ф.-м.н., специальность 01.02.05. Казань, 1999. 31 с.
8. *Еришов Э.Д., Комаров И.А., Чувиллин Е.М.* Прогноз процессов взаимодействия жидких техногенных рассолов, захороняемых в массиве мерзлых пород // Геоэкология. 1997. № 2. С. 19–29.
9. *Костерина Е.А.* Математическое моделирование и численное решение одномерных задач насыщено-ненасыщенной фильтрации: автореф. дис. ... к.ф.-м.н., специальность 05.13.18. Казань, 1999. 15 с.
10. *Grenier C., Anbergen H., Bense V., Chanzy Q. et al.* Groundwater flow and heat transport for systems undergoing freeze-thaw: Intercomparison of numerical simulators for 2D test cases // Advances in Water Resources. 2018. V. 114. P. 196–218.
11. *McKenzie J.M., Voss C.I., Siegel D.I.* Groundwater flow with energy transport and water—ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs // Advances in Water Resources. V. 30. Is. 4. 2007. P. 966–983.
12. *Mohammed, A.A., Bense, V.F., Kurylyk B.L. et al.* Modeling reactive solute transport in permafrost-affected groundwater systems // Water Resources Research. 2021. 57(7), art. e2020WR028771. <https://doi.org/10.1029/2020WR028771>
13. *Diersch, H.-J. G.* FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. FEFLOW. 2014. 1018 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-38739-5>

DEVELOPMENT OF HEAT AND MASS TRANSFER MODULUS TO FEFLOW CODE FOR CALCULATION OF BRINE LOADED TO PERMAFROST GROUND

I. A. Rastorguev^{a,b,#}, I. V. Litvinova^{b,##}, N. A. Iost^b, A. V. Ilin^b

^a*Kurchatov Institute, pl. Kurchatova, 1, Moscow, 123098 Russia*

^b*AK "Alrosa", ul. Sovetskaya, 5, Novosibirsk, 630007 Russia*

[#]*E-mail: stiar@mail.ru*

^{##}*E-mail: LitvinovaIV@alrosa.ru*

The article discusses the application of FreezeThaw75 module, developed by one of the authors to calculate heat and mass transfer taking into account water–ice and ice–water–water phase transitions. Numerical simulations are compared with the analytical solution and other software codes. The module was tested at one of the injection sites in Daldino-Alakitskii district of Yakutia. FreezeThaw75 module was developed in relation to Feflow v7.4–7.5 model environment. The module was tested on a model of brine injection into frozen rocks. The model simultaneously takes into account the movement of groundwater flow, heat and mass transfer and phase transitions. A feature of the calculations in the developed model is the consideration of large injected volumes of highly mineralized brines. It influences the degradation of permafrost and takes into account the cryohydrogeological conditions of the site. Brines are injected into permafrost rocks with a high absorption capacity especially in areas confined to zones of tectonic disturbances. The developed module can adjust the predicted potential of the operated injection sites. It can also act as an additional element of control over the injection process and the formation of an artificial aquifer in the permafrost rocks.

Keywords: *heat and mass transfer, FreezeThaw75 module, phase transitions, Daldyno-Alakitskii district, groundwater flow model, permafrost, brines, hydraulic conductivity, effective porosity, Feflow*

REFERENCES

1. Gol'dberg, V.M., Skvortsov, N.P., Luk'yanchikova L.G. [Subsurface disposal of industrial sewage]. Moscow, Nedra Publ., 1994, 282 p. (in Russian)
2. Drozdov, A.V. Disposal of drainage brines to permafrost rocks (by the example of Siberian platform permafrost zone). Irkutsk, IGTU Publ., 2007, 296 p. (in Russian)
3. Drozdov A.V. [Assessment of the prospects of Levoberezhny site for the disposal of drainage brines from the Udachnaya pit]. *Izv. Sib. otd. Sektsii nauk o Zemle RAEN*, 2013, no. 1 (42). pp. 146–156. (in Russian)
4. Drozdov A.V. [Structural tectonic criteria of assessing rock massif capacity for disposal of industrial sewage from diamond-mining enterprises in the Western Yakutiya cryolithozone]. *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. X, no. 2, pp. 27–45. (in Russian)
5. Drozdov A.V. Gotovtsev, S.P. [Specific features of brine migration in the permafrost zone upon their subsurface disposal]. In: [Formation of groundwater in the cryolithozone]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 1992, pp. 31–48. (in Russian)
6. Drozdov, A.V., Iost, N.A., Lobanov, V.V. [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, Izd-vo IGTU, 2008. 507 p. (in Russian)
7. Egorov, A. G. [Filtration effects in the tasks of hat and mass transfer and deformation of saturated porous media]. Extended Abstract of Doctoral (Phys.-Math.) Dissertation, Kazan, 1999, 31 p. (in Russian)
8. Ershov, E.D., Komarov, I.A., Chuvilin, E.M. [Forecast of interaction processes between liquid technogenic brines disposed in frozen rock massifs]. *Geoekologiya*, 1997, vol. 2, pp. 19–29. (in Russian)
9. Kosterina, E.A. [Mathematical modeling and numerical solution of unidimensional tasks of saturated-unsaturated filtration]. Extended Abstract of Cand. Sci. (Phys.-Math.) Dissertation, Kazan, 1999, 15 p. (in Russian)
10. Grenier, C., Anbergen, H., Bense, V., Chanzy, Q. et al. Groundwater flow and heat transport for systems undergoing freeze-thaw: Intercomparison of numerical simulators for 2D test cases. *Advances in Water Resources*, 2018, vol. 114, pp. 196–218.
11. McKenzie, J.M., Voss, C.I., Siegel, D.I. Groundwater flow with energy transport and water–ice phase change: Numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs, *Advances in Water Resources*, 2007, vol. 30, issue. 4, pp. 966–983.
12. Mohammed, A.A., Bense, V.F., Kurylyk BL. et al. Modeling reactive solute transport in permafrost-affected groundwater systems, *Water Resources Research*, 2021, 57(7), art. e2020WR028771. <https://doi.org/10.1029/2020WR028771>
13. Diersch, H.-J.G. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. FEFLOW, 2014, 1018 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-38739-5>

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 624.131

ОЦЕНКА ВОДНОГО И СОЛЕВОГО БАЛАНСА СВАЛОЧНОГО ТЕЛА
МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИГОНА ТКО
В Г. ДУБНА© 2024 г. И. А. Позднякова^{1,*}¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: irina_pozd58@mail.ru

Поступила в редакцию 08.12.2022 г.

После доработки 12.12.2023 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

Для прогноза миграции в подземных водах загрязняющих веществ, поступающих из свалочных тел на полигонах складирования твердых коммунальных бытовых отходов (полигон ТКО), необходимы данные об интенсивности инфильтрационного питания и концентрации загрязняющих веществ во влаге, поступающей на уровень подземных вод (УПВ). Показано, как неопределенность и недостаточность информации о свалочном теле влияют на оценку этих параметров, в каких случаях возможно использование информации об объекте-аналоге, как тестовые расчеты помогают проверить гипотезы формирования загрязнения подземных вод под свалочным телом. На примере полигона ТКО в г. Дубна показано, что для оценки инфильтрационного питания можно использовать программу HELP по расчету влагопереноса в ненасыщенной зоне, а для оценки концентрации хлорид-иона во влаге, поступающей на уровень подземных вод, – программу VS2DT по расчету миграции загрязняющих веществ с влагой в ненасыщенной зоне. Полученные в результате расчетов водного и солевого баланса свалочного тела на полигоне ТКО в Дубне диапазоны величины инфильтрационного питания и концентраций хлорид-иона в инфильтрующейся влаге под свалочным телом были в дальнейшем использованы для моделирования переноса хлорид-иона в подземных водах.

Ключевые слова: подземные воды, свалочное тело, фильтрат, загрязнение, влагоперенос, миграция, инфильтрация, концентрация, численные расчеты, хлорид-ион

DOI: 10.31857/S0869780924020066; EDN: DZPDHR

ВВЕДЕНИЕ

Влияние свалочных тел на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) на подземные воды заключается в том, что они долгие годы могут поставлять вместе с фильтратом в подземные воды загрязняющие вещества (ЗВ). Фильтрат – влага, образующаяся при просачивании атмосферных осадков через толщу отходов и стекающая на уровень подземных вод (УПВ) под свалкой. ЗВ поступают в фильтрат из отходов в результате простых реакций их растворения или сложных биохимических процессов разложения. При поступлении фильтрата на УПВ под свалочным телом происходит его разбавление чистыми водами, поступающими с соседних участков. Далее ЗВ переносятся потоком подземных вод в направлении их движения.

Степень влияния свалочного тела на загрязнение подземных вод определяется количеством фильтрата, концентрацией ЗВ в нем, степенью

разбавления чистыми подземными водами, скоростью и дальностью переноса ЗВ с потоком. Для прогноза переноса загрязнения подземными водами необходимо оценить количество фильтрата и концентрации ЗВ в нем. Количество влаги, являющееся инфильтрационным питанием и поступающее на УПВ, можно рассчитать, как статью водного баланса свалочного тела при помощи программы [11]. Программа HELP была создана для составления и обоснования проектов свалок, но широко используется и для оценок утечек фильтрата в подземные воды [4–8].

Зная инфильтрацию и концентрацию ЗВ в фильтрате, можно рассчитать концентрацию ЗВ во влаге, достигающей УПВ, с помощью программы VS2DT по расчету миграции ЗВ в ненасыщенной зоне [9], а в дальнейшем использовать полученные величины для прогноза миграции ЗВ в подземных водах.

В качестве объекта исследования был выбран полигон ТКО «Дубна Правобережная», который находится в Городском округе Дубна на северо-западе Московской области. Полигон функционировал 30 лет, за это время на площади 42000 м² было складировано около 400 000 т ТКО. По данным инженерно-геологических исследований, проводившихся при разработке проекта рекультивации полигона, высота свалочного тела в центральной части составляла 17–19 м, на периферии – от 1 до 5 м. Свалочное тело представляет собой чередование слоев отходов мощностью 5 м и суглинков мощностью 0.5–0.6 м. ТКО состоят из пластика, стекла, металла, древесины, текстиля, бумаги, пищевых остатков и других органических отходов. С поверхности свалочное тело перекрыто песчано-глинистым грунтом мощностью 0.6 м.

РАСЧЕТ ВОДНОГО БАЛАНСА СВАЛОЧНОГО ТЕЛА

Методика исследований

Кроме атмосферных осадков, в фильтрат свалочного тела поступает влага из отходов, как удерживаемая и высвобождающаяся при их уплотнении, и как продукт биохимических реакций [7]. Кроме того, свалочное тело часто поливают с поверхности водой для избежания возгорания. Влага, поступающая в фильтрат из перенасыщенных отходов, может быть основным источником водного баланса свалок, если месячные объемы фильтрата в несколько раз превышают месячные атмосферные осадки. В полусухих и засушливых регионах образование фильтрата связано главным образом с биохимическими процессами [10].

В данном исследовании при расчете водного баланса свалочного тела предполагается, что источником фильтрата являются атмосферные осадки, и никакие другие источники и механизмы образования фильтрата не учитывались.

На количество фильтрата, образующегося за счет атмосферных осадков, влияют плотность, влажность и коэффициент фильтрации отходов. При проведении полевых исследований свалочных тел в разное время в нескольких странах было отмечено увеличение плотности и снижение проницаемости отходов по глубине [12], а также наличие нескольких зон в свалочном теле по направлению от центра к краям с разными профилями влажности и способностью задерживать влагу [10]. Так как параметры ТКО на полигоне в Дубне не определялись, то в расчетах водного баланса использованы данные, приводимые в публикациях и базах данных, а изменения

параметров свалочного тела с глубиной и по площади не учитывались.

Расчет водного баланса свалочного тела на полигоне ТКО в Дубне выполнен при помощи программы HELP, которая представляет гидрологическую модель водного баланса полигонов (открытых и закрытых с поверхности) и других сооружений складирования ТКО. Программа разработана в США Агентством по охране окружающей среды (US EPA) для выбора и проектирования оптимальной конструкции полигона ТКО в отношении обеспечения минимальных утечек фильтрата в подземные воды на основе анализа водного баланса свалочного тела. Программа позволяет учесть в конструкции полигонов различные комбинации составляющих его элементов: растительность, насыпной грунт, отходы, боковой дренаж, изолирующие грунты с низкой проницаемостью и синтетические геомембранные вкладыши.

В балансовых расчетах предполагается, что атмосферные осадки, попадающие на поверхность свалочного тела (в том числе в результате снеготаяния), сначала тратятся на поверхностный сток, затем на эвапотранспирацию (поглощение влаги растениями и испарение с поверхности растений и свалки) и впитывание влаги почвой. Оставшаяся после этого влага стекает под действием гравитации к основанию свалки или до дренирующих слоев.

Для расчета водного баланса используется около 10 расчетных модулей и 3 блока данных: климатический; свойства материала, составляющего свалочное тело и пород зоны аэрации; проектные решения организации полигона (покрытие, изоляция, дренаж).

Расчет водного баланса начинается с *климатического блока*. Водный баланс свалочного тела рассчитывается посуточно, что требует задания для каждого суток расчетного периода климатических данных: осадки, температура воздуха, инсоляция. Специальная программа в климатическом модуле Weather Generator позволяет на основе имеющихся за годовой период среднемесячных температур воздуха и осадков стохастически сгенерировать посуточные климатические данные для расчетного периода любой продолжительности.

Движение влаги в свалочном профиле рассматривается как квазидвумерное:

- вертикальное – гравитационное стекание через насыпные грунты, свалочное тело, слабопроницаемые грунты и изолирующие искусственные мембраны;

- горизонтальное – в слоях, дренирующих свалочное тело.

Гравитационное стекание рассчитывается по закону Дарси для зоны неполного насыщения,

Таблица 1. Среднегодовое количество осадков и температура*

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Осадки, мм	49.2	40.4	36.9	40.5	56.1	75.7	88.7	78.1	67.5	65.3	55.6	53.1
T, °C	-10.2	-9.2	-4.3	4.4	11.9	16	18.1	16.3	10.7	4.3	-1.9	-7.3

*Источник информации: доступ к данным (meteo.ru).

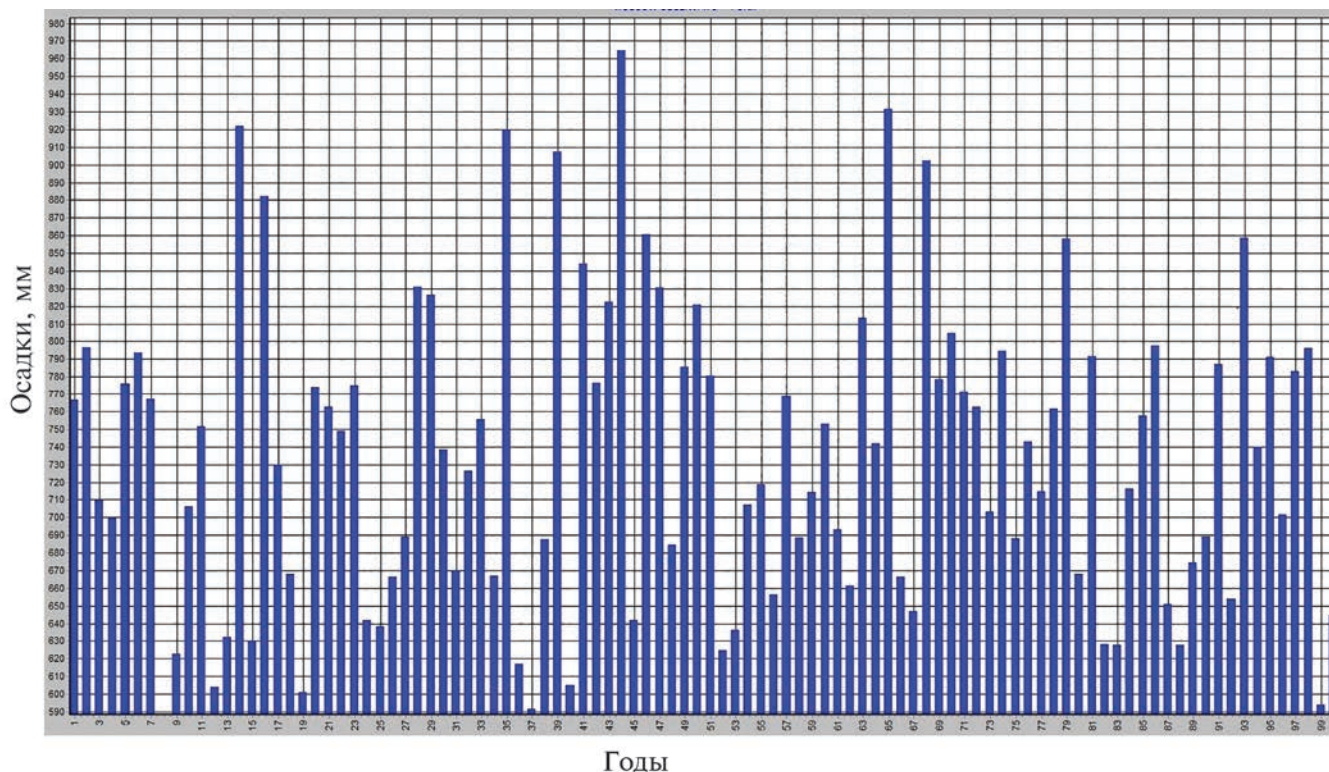


Рис. 1. Годовое количество осадков в Москве в течение 100-летнего периода, мм.

при этом для связи коэффициента фильтрации с коэффициентом влагопереноса и высоты всасывания с влажностью используется соотношение Брукса-Кори. Для расчета переноса влаги программа HELP содержит большую базу данных гидрофизических свойств (общая пористость, полевая влагоемкость, влажность увядания и коэффициент фильтрации в условиях насыщения и др.) более 42-х типов материалов, составляющих свалочное тело: отходов, пород, геомембран.

В выполненных расчетах водного баланса свалочного тела на полигоне в Дубне для получения среднегодовых значений количества осадков, поверхностного стока, эвапотранспирации и инфильтрации расчетный период составлял 100 лет. Для генерации суточных показателей осадков и температуры в течение 100 лет были использованы данные метеостанции № 27612, расположенной в г. Москва на территории Выставки достижений народного хозяйства, по месячным осадкам

и температуре, осредненным за последние 60 лет (табл. 1).

Результаты расчета водного баланса выводятся программой для каждого суток, месяца, года и суммарно за расчетный период. Пример сгенерированных программой в многолетнем разрезе годовых осадков показан на рис. 1.

При расчетах водного баланса профиль свалочного тела принимался в двух вариантах: (1) состоящий полностью из отходов и (2) в виде переслаивания отходов и слабопроницаемых суглинков. То есть вариант 2 был близок к реальному строению свалочного тела (рис. 2).

Расчетный профиль ненасыщенной зоны включал 9 слоев до кровли водоносного горизонта, из них 8 – в свалочном теле, и 1 – в моренных суглинках (табл. 2). Гидрофизические характеристики слоев подбирались из базы данных HELP, публикаций и результатов инженерно-геологических

Таблица 2. Расчетный профиль ненасыщенной зоны свалочного тела (вар. 2)

Номер слоя	Тип материала	Мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	Источник информации*
1	Песчано-глинистый насыпной грунт	0.6	0.44	А
2	Отходы	1.0	0.78	Б
3	Суглинок насыпной	0.6	0.1	А
4	Отходы	6.0	0.78	Б
5	Суглинок насыпной	0.6	0.1	А
6	Отходы	5.7	0.78	Б
7	Суглинок насыпной	1.0	0.1	А
8	Отходы	2.7	0.78	Б
9	Суглинок моренный	1.4	0.002	В

*А – база данных HELP; Б – [8]; В – инженерно-геологические изыскания.

Таблица 3. Среднегодовое водное балансе свалочного тела

Статьи водного баланса	Вариант 1		Вариант 2	
	мм	%	мм	%
Осадки	734	100	734	100
Поверхностный сток	146	20	176	24
Эвапотранспирация	413	56	391	53
Фильтрация вниз к основанию свалочного тела (инфильтрация)	175	24	167	23

исследований при рекультивации полигона ТКО в Дубне.

Как выглядят расчетный профиль и результаты расчета водного баланса свалочного тела в программе HELP показано на рис. 3, посуточная динамика изменения количества осадков и инфильтрации за столетний период – на рис. 4.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчета годового водного баланса свалочного тела для двух вариантов его строения, осредненные за столетний период, представлены в табл. 3.

Максимальное количество осадков расходуется на эвапотранспирацию (53–56%), остальное – практически поровну на поверхностный сток (20–24%) и инфильтрацию (23–24%). Сравнение результатов расчета водного баланса, полученных для двух вариантов строения свалочного тела, показывает, что если отходы переслаиваются слабопроницаемыми суглинками, то в среднемноголетнем

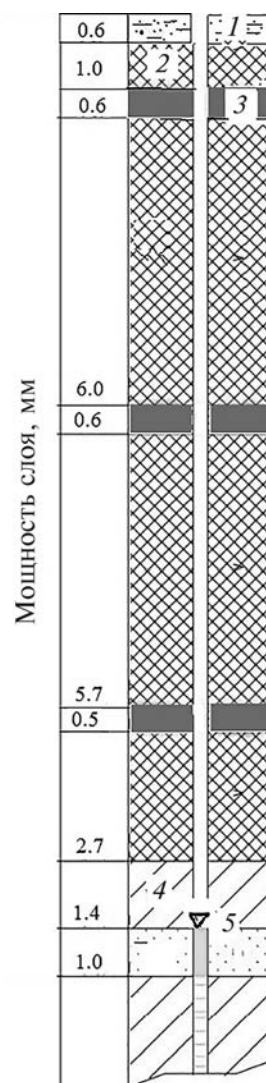


Рис. 2. Строение свалочного тела (вар. 2): 1 – песчано-глинистый насыпной грунт; 2 – отходы; 3 – насыпной суглинок; 4 – суглинок моренный; 5 – уровень подземных вод.

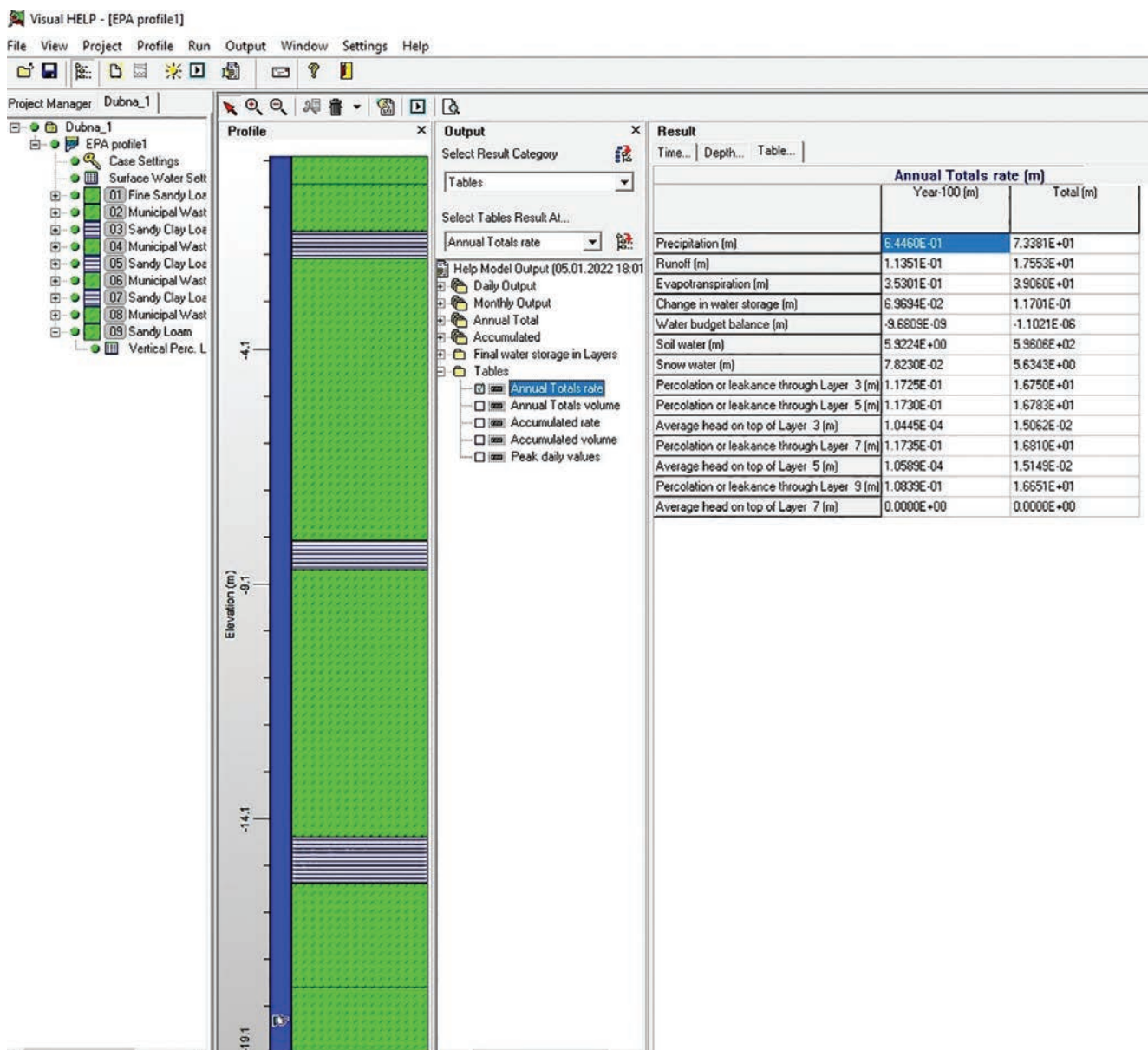


Рис. 3. Расчетный профиль свалочного тела и результаты расчета водного баланса (вар. 2).

разрезе интенсивность инфильтрации и эвапотранспирации несколько уменьшается, а поверхностный сток увеличивается.

Полученные результаты расчета водного баланса свалочного тела на полигоне ТКО в Дубне в целом не противоречат сведениям, приведенным в научных публикациях. Так, эвапотранспирация может составлять от 30 до 70%, поверхностный сток от 25 до 40%, интенсивность инфильтрации до 43% от осадков за год [4–6, 8]. Сравнение абсолютных величин показывает, что рассчитанное при помощи Weather Generator и осредненное за столетний период годовое количество осадков 734 мм (см. табл. 3, вар. 2) превышает данные метеостанции № 27612 (639 мм). Величина

эвапотранспирации 391–413 мм/год получена с учетом характерной для свалочного тела на полигоне в Дубне бедной растительности и преобладания физического испарения с его поверхности, засыпанной слабопроницаемыми задерживающими влагу суглинистыми грунтами. Она хорошо согласуется с характерной для Московского региона величиной эвапотранспирации 373–465 мм/год для разного типа почв [1]. Величина поверхностного стока 146–176 мм/год является максимально возможной, так как свалочное тело на полигоне в Дубне перекрыто с поверхности слабопроницаемыми грунтами, а крутизна его склонов достаточная, чтобы сток был возможен со всей его поверхности.

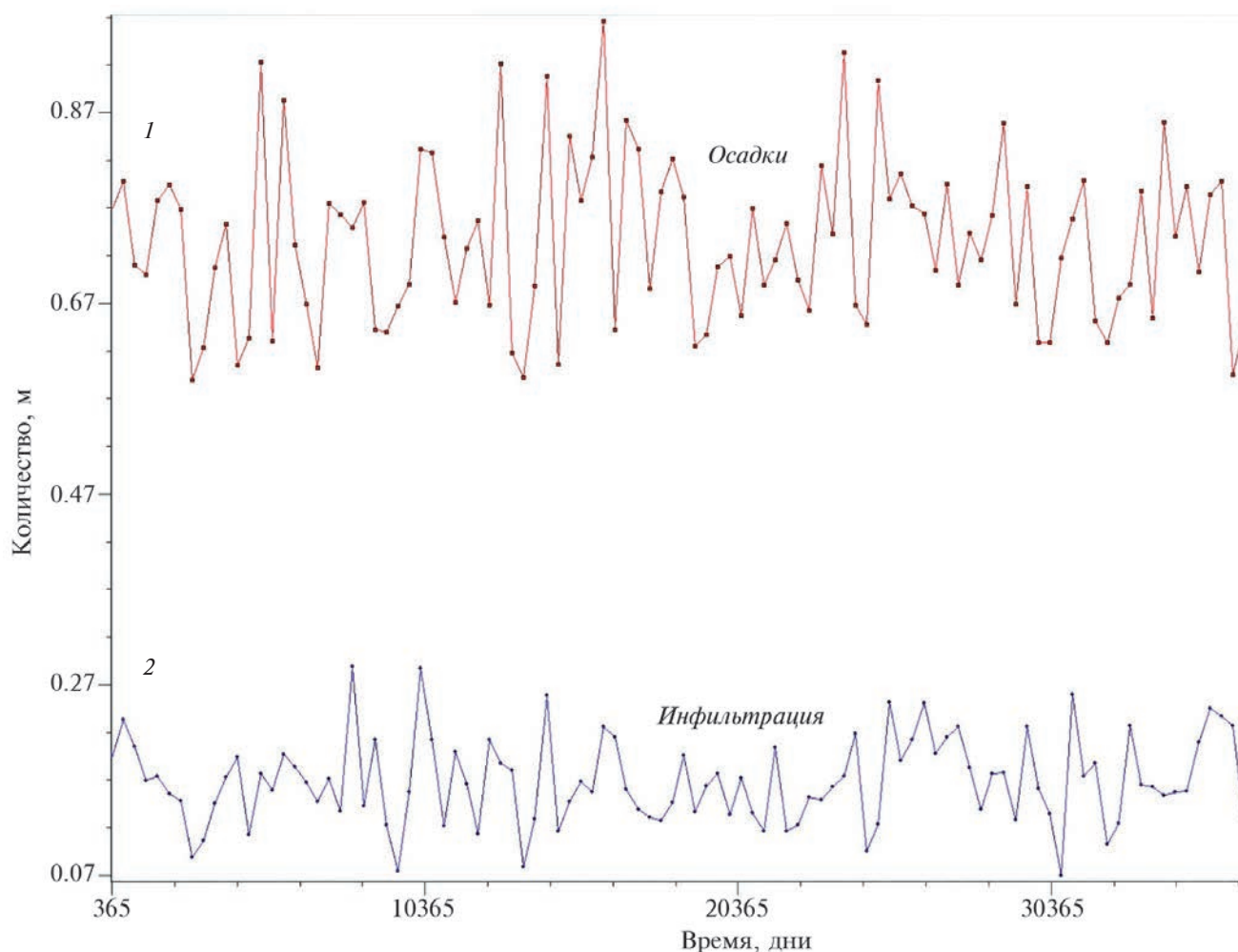


Рис. 4. Результаты расчета суточных осадков (1) и инфильтрации (2) в течение 100 лет (вар. 2).

Величина инфильтрации составила 167–175 мм/год, что превышает рассчитанные при помощи программы HYDRUS для близкой климатической зоны значения естественной инфильтрации 60–100 мм/год [2]. Для участков с мощностью свалочного тела 3–5 м рассчитанное при помощи HELP значение инфильтрационного питания составило 100 мм/год. Полученное в расчетах количество влаги, поступающей на УПВ под свалочным телом, превышает интенсивность инфильтрации, оцененную для естественных условий. Такая ситуация допустима для свалочных тел в нашей климатической зоне, так как инфильтрационное питание под ними может составлять до 50–60% от годовых осадков [10].

Таким образом, в дальнейших расчетах концентраций ЗВ, поступающих на УПВ, диапазон значений интенсивности инфильтрационного питания был принят от минимальных значений, близких к естественным в данной климатической зоне, до максимальных, составляющих более 40% от годовой суммы осадков, т.е. от 100 до 400 мм/год.

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХЛОРИД-ИОНА, ПОСТУПАЮЩИХ ИЗ СВАЛОЧНОГО ТЕЛА

Методика исследований

Для расчета концентраций ЗВ в фильтрате, поступающем на УПВ под свалочным телом, был выбран консервативный элемент хлорид-ион, не вступающий в реакции с другими веществами и породами. Концентрация хлорид-иона (Cl^-) снижается во влаге зоны аэрации и подземных водах только в результате уменьшения его концентрации в источнике поступления и разбавления чистой влагой.

Концентрация Cl^- в фильтрате является также одним из индикаторов геохимической стабильности свалочного тела, наряду с химическим и биологическим потреблением кислорода и концентрацией иона аммония [3]. Cl^- поступает во влагу (фильтрат) в течение всего срока существования свалочного тела в результате процессов

дехлорирования хлорсодержащих органических соединений и растворения водорастворимых компонентов пищевых отходов, текстиля, бумаги, картона и т.д. Наблюдения показали, что максимальные концентрации Cl^- в фильтрате наблюдаются в первые 5–6 лет существования полигона. Затем за счет поступления чистых атмосферных осадков и уменьшения растворимых хлорсодержащих соединений в отходах в течение 15–20 лет (по данным полевых исследований) и 25–30 лет (по данным лабораторных экспериментов) происходит снижение концентраций Cl^- в фильтрате до значений ПДК в подземных водах – 350 мг/л и менее [3].

По возрасту (более 30 лет в местах максимальной мощности) свалочное тело на полигоне в Дубне уже должно было бы достигнуть стадии геохимической стабильности по хлорид-иону, однако имеющиеся данные о концентрации Cl^- в подземных водах в районе его расположения указывают на то, что процесс очищения свалочного тела незакончен. По данным изысканий в 2019 г. концентрация Cl^- в водоносном горизонте под свалочным телом на участке, где его мощность около 17 м, составляла 2836 мг/л, а на периферии, где мощность свалочного тела не превышала 5 м до 3119–3403 мг/л. Фоновым значением для подземных вод на окружающей территории можно считать концентрацию Cl^- 34 мг/л в колодезной воде на территории садового товарищества, расположенного в 200 м юго-восточнее полигона ТКО.

Таким образом, высокие концентрации Cl^- в подземных водах под свалочным телом указывают на то, что на начало рекультивации полигона значительное количество хлорид-иона могло поступать на УПВ с инфильтрационным питанием.

Для расчета переноса Cl^- с влагой в свалочном теле была использована программа VS2DT – численная конечно-разностная модель миграции ЗВ с влагой в ненасыщенной зоне [9]. Моделирование миграции ЗВ происходит на основе численного решения уравнения Ричардсона, описывающего вертикальное движение влаги в частично насыщенном поровом пространстве, и сопряженного с ним уравнения конвективно-дисперсионного массопереноса для расчета массопереноса в зоне аэрации. Полученные в результате решения уравнения Ричардсона распределения напора и влажности по профилю зоны аэрации затем использовались для вычисления скоростей движения влаги в зоне аэрации в расчетах массопереноса.

Основные допущения в расчетах:

— свалочное тело представляет собой зону неполного насыщения,

— влага в свалочном теле формируется из атмосферных осадков, поступающих на его поверхность,

— загрязняющие вещества моментально поступают из отходов в инфильтрующуюся влагу и мигрируют до УПВ.

В расчетах воспроизводились реальные профили свалочного тела мощностью 1; 3–5 и 19 м. Значения параметров влагопереноса для профилей принимались такие же, как и при расчете интенсивности среднемноголетней инфильтрации. Значения параметров дисперсии, молекулярной диффузии и плотности скелета сухой породы принимались для всех типов отложений по умолчанию из базы данных программы VS2DT [9]. Для решения уравнения влагопереноса на верхней границе расчетной области задавался поток с постоянной интенсивностью, равной интенсивности инфильтрации, на нижней – нулевая высота давления. На верхней границе массопотока для решения миграционной задачи задавалась постоянная концентрация Cl^- .

Основная проблема при выполнении расчетов – неопределенность в определении исходной концентрации хлорид-иона в фильтрате, необходимой для дальнейших расчетов, из-за некондиционного анализа фильтрата при инженерно-геоэкологических изысканиях. Тогда как диапазон концентрации Cl^- в фильтрате, по опубликованным данным, может быть очень большим – от 300 до >15 000 мг/л [5, 12]. Одним из способов преодоления этого затруднения является привлечение данных моделирования миграции ЗВ с фильтратом на объекте-аналоге.

Примерный диапазон концентраций Cl^- в фильтрате из свалочного тела на полигоне в Дубне был оценен по одному из хорошо изученных объектов складирования твердых коммунально-бытовых отходов в Греции, существующему около 23 лет (объекту-аналогу).

Мощность свалочного тела на объекте-аналоге ~22.5 м. Концентрация Cl^- в фильтрате 3074–5375 мг/л, а в подземных водах под свалочным телом и вблизи него 878–939 мг/л. Рассчитанная при помощи программы HELP для объекта-аналога среднемноголетняя интенсивность инфильтрации 167 мм/год (43% от годовой суммы осадков) [8] близка к данным, полученным для полигона в Дубне (см. табл. 3). Сравнение свалочных тел показывает их идентичность по составу отходов, возрасту, мощности, строению и количеству фильтрата, поступающему в подземные воды. Это позволяет предположить сходность состава и концентрации ЗВ в фильтрате.

Задав характерные параметры свалочного тела объекта-аналога: срок существования, мощность, коэффициенты фильтрации отходов и изолирующих суглингов, интенсивность инфильтрации и диапазон изменения концентрации Cl^- в фильтрате, по программе VS2DT для свалочного тела в Дубне были рассчитаны концентрации Cl^- во влаге по всему его профилю, а также

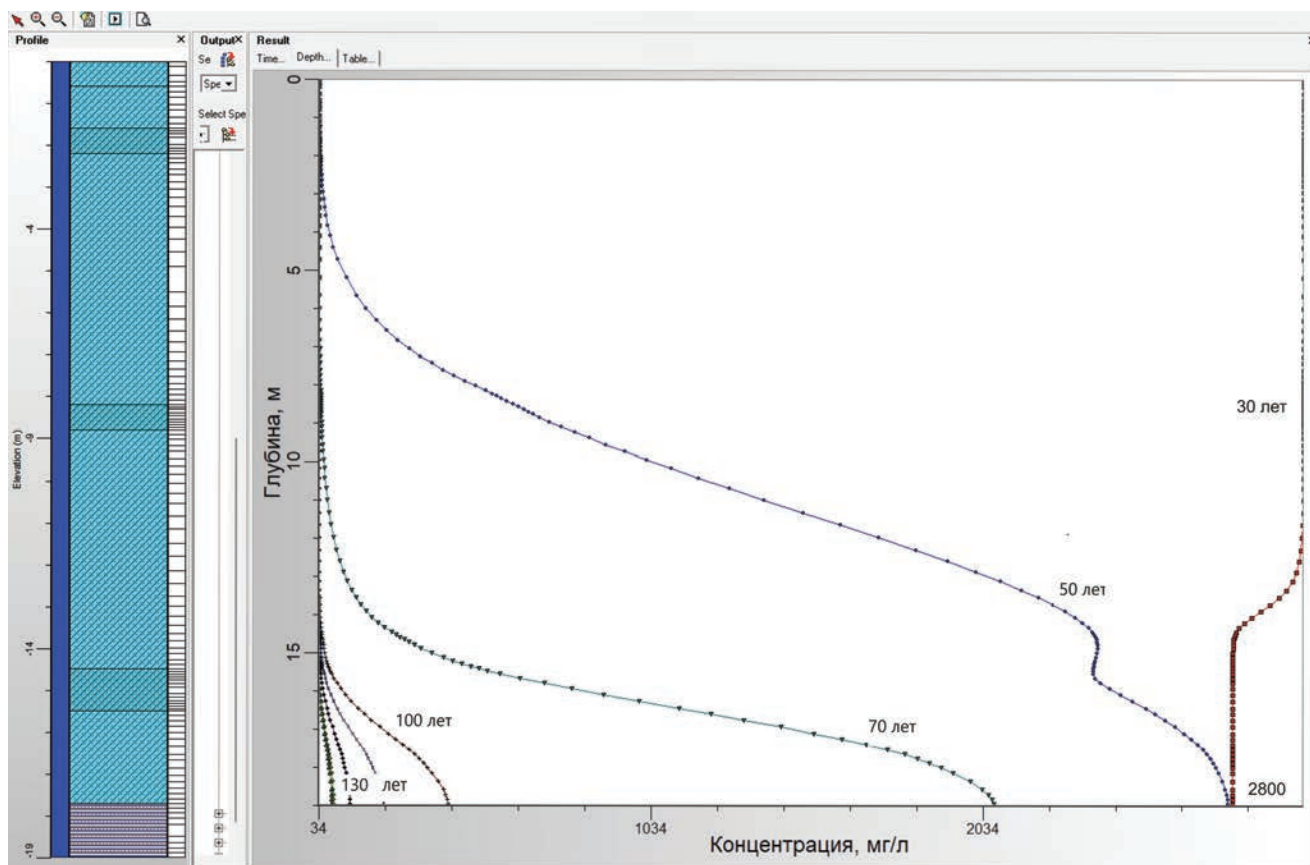


Рис. 5. Расчетный профиль и кривые концентрации хлорид-иона во влаге в центральной части свалочного тела на разные моменты времени после рекультивации полигона.

поступающие на УПВ под ним на разные моменты времени, в том числе на конец расчетного периода (23 года). Полученные результаты расчета совпали с концентрациями Cl^- в подземных водах на объекте-аналоге, тем самым была подтверждена возможность применения программы VS2DT для расчета миграции хлорид-иона в свалочном теле и использования данных о концентрации Cl^- в фильтрате на объекте-аналоге (3000–5500 мг/л) для подбора значений его концентраций в фильтрате на полигоне в Дубне.

Расчеты миграции хлорид-иона в свалочном теле на полигоне в Дубне проводились в следующей последовательности. Первоначально решалась обратная задача по подбору интенсивности инфильтрации и концентрации Cl^- в инфильтрующейся влаге таким образом, чтобы в конце 30-летнего периода существования свалочного тела концентрации Cl^- в поступающей на УПВ влаге были сопоставимы с его концентрациями в подземных водах в изыскательских скважинах. Расчеты выполнялись для реального строения профиля свалочного тела (вар. 2). Подобранные значения должны были соответствовать допустимым: интенсивность инфильтрации находиться в диапазоне 100–400 мм/год, концентрации

хлорид-иона в инфильтрующейся влаге – 3000–5500 мг/л.

Используя сформировавшийся на конец расчета профиль концентрации Cl^- во влаге свалочного тела в качестве начальных условий на втором этапе решалась прогнозная задача. Прогноз заключался в расчете концентраций хлорид-иона во влаге, поступающей на УПВ, с начала рекультивации полигона, когда на поверхности свалочного тела интенсивность инфильтрации соответствовала естественным, характерным для климатической зоны значениям 60 мм/год [2], а концентрация Cl^- в инфильтрующейся влаге равна нулю. Такое низкое значение интенсивности инфильтрации в прогнозных расчетах принято для того, чтобы оценить максимально возможное время очищения свалочного тела от хлорид-иона за счет разбавления чистой влагой с поверхности и стекания загрязненной влаги на УПВ.

Результаты и их обсуждение

Расчеты по подбору концентрации хлорид-иона в инфильтрующейся влаге при выбранном диапазоне изменений интенсивности инфильтрации (100–400 мм/год) показали, что при

минимальном ее значении (100 мм/год) концентрации Cl^- должны были бы превышать 8000 мг/л, чтобы на конец расчетного периода в подземные вод под свалочным телом в центральной его части на УПВ с инфильтрующейся влагой поступали бы 2800 мг/л Cl^- . Так как концентрация 8000 мг/л существенно превышает выбранный диапазон концентраций Cl^- в фильтрате на объекте-аналоге, то дальнейший подбор концентраций хлорид-иона в фильтрате проводился с более высокой интенсивностью инфильтрации: рассчитанной для свалочного тела на полигоне в Дубне – 175 мм/год, и максимальной 390 мм/год, что составляет 43% от годовой суммы осадков, как и на объекте-аналоге.

В результате расчетов были подобраны следующие значения: при интенсивности инфильтрации 175 мм/год концентрация хлорид-иона в инфильтрующейся влаге в центре свалочного тела должна составлять 3000 мг/л, в склоновой части – 3500 мг/л, в краевой части – 3300 мг/л. При интенсивности поступающей на поверхность свалочного тела инфильтрации 390 мм/год на полигоне в Дубне концентрации хлорид-иона в центральной части свалки составили 2800 мг/л, для склонов – от 3300 мг/л, для краевой части – от 3100 мг/л.

Прогнозные расчеты показали, что при снижении интенсивности инфильтрации на поверхности свалочного тела до естественных 60 мм/год и нулевой концентрации хлорид-иона в инфильтрующейся влаге концентрация Cl^- в фильтрате по профилю свалочного тела будет постепенно снижаться (рис. 5). Но поскольку интенсивность инфильтрации низкая, процесс очищения свалочного тела от хлорид-иона будет происходить длительное время. Таким образом, через 40 лет после рекультивации полигона на УПВ поступит более 2000 мг/л хлорид-иона, а снижение его концентраций до фоновых значений в подземных водах (34 мг/л) займет более 100 лет в центре свалочного тела (см. рис. 5), более 80 лет в его склоновой и более 50 лет в краевых частях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты переноса влаги и хлорид-иона в свалочном теле на примере полигона ТКО в Дубне показали, что свалочное тело долгие годы после рекультивации остается источником поступления ЗВ в подземные воды, что необходимо учитывать при прогнозе их загрязнения. Прогноз загрязнения подземных вод в районе свалки должен выполняться поэтапно.

На первом этапе при помощи расчетов влаги и массопереноса в ненасыщенной зоне, которой является свалочное тело, следует определить интенсивность инфильтрации и концентрации загрязняющих веществ, поступающих на уровень подземных вод под свалочным телом в период

эксплуатации полигона и после его рекультивации. Существующие программные средства позволяют оценить эти величины: HELP – рассчитать интенсивность инфильтрационного питания, а VS2DT – рассчитать концентрации загрязняющих веществ, поступающих с инфильтрационным питанием.

На втором этапе прогноза загрязнения подземных вод использовать полученные результаты для задания граничных условий при геофильтрационном и геомиграционном моделировании загрязнения подземных вод.

Такой поэтапный прогноз позволит более достоверно оценить влияние свалочного тела на загрязнение подземных вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-0500574 “Долгосрочное влияние свалок и полигонов твердых коммунальных отходов на трансформацию химического состава подземных вод”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гринецкий С.О.* Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2011. № 3. С. 41–52. <https://doi.org/10.3103/S0145875211030057>
2. *Гринецкий С.О., Новоселова М.В.* Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. С. 1–12.
3. *Слюсарь Н.Н., Вайсман Я.И., Коротаев В.Н.* Оценка долгосрочных эмиссий объектов захоронения твердых коммунальных отходов: результаты полевых исследований и лабораторного моделирования // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 4. С. 32–39.
4. *Alslaihi T., Mogheir Y., Afifi S.* Analysis of landfill components in estimating the percolated leachate to groundwater using the HELP model // Water Science and Technology. 2010. V. 62. № 8. P. 1727–1734.
5. *Al-Suraifi A.* Simulation of contaminants transport and groundwater flow for Basrah landfill site. // Engineering and technology journal. 2017. V. 35. № 6. P. 560–570.
6. *Beck-Broichsitter S., Gerke H., Horn R.* Assessment of Leachate Production from a Municipal Solid-Waste Landfill through Water-Balance Modeling // Geosciences, 2018. V. 8. № 10: 372.
7. *Cossu R., Stegmann R.* Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technology. 2019. 1174 p. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02435-0>
8. *Fatta D.A.* A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area // Environmental Geochemistry and Health. 1999. V. 21. P. 175–190.
9. *Healy R.W.* Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the US Geological Survey's computer program VS2D // Water-Resources Investigations Report. 1990. 90:4025.
10. *Podlasek A.* Modeling leachate generation: practical scenarios for municipal solid waste landfills in Poland // Environmental Science and Pollution Research International. 2023. V. 30. № (5). P. 13256–13269.

11. Schroeder, R., Dozier, T.S., Zappi, P.A. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering Documentation for Version 3, 1994, EPA/600/9-94/xxx, US Environmental Protection Agency Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, USA. Document Display | NEPIS | US EPA
12. Yang R., Xu Z., Chail J. A review of characteristics of landfilled municipal solid waste in several countries: physical composition, unit weight, and permeability coefficient // Polish Journal of Environmental Studies. 2018. V. 27. № 6. P. 2425–2435.
13. Zeng D., Chen G., Zhou P., Xu H. Factors influencing groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in the Qinghai-Tibetan plateau // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. V. 211. 111913. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111913>

ASSESSMENT OF THE WATER AND MASS BALANCE IN THE LANDFILL BODY BY MODELLING USING THE EXAMPLE OF THE DUBNA CITY LANDFILL

I. A. Pozdnyakova^{a, #}

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: irina_pozd58@mail.ru*

To predict the migration of pollutants in groundwater from the landfill site, it is necessary to know the infiltration rate and the concentration of pollutants in the moisture entering the groundwater level below the landfill. It is shown that the HELP program for calculating moisture transport in the unsaturated zone can be used to estimate the infiltration rate by the example of the municipal solid waste in Dubna. To estimate chloride ion concentration in the leachate entering the groundwater level, the VS2DT program for calculating the transport of pollutants with moisture in the unsaturated zone can be used. It is shown how uncertainty and insufficiency of information about the landfill site affects the estimation of these parameters, in what cases it is possible to use information about a similar dump, how test calculations help to verify hypotheses of formation of groundwater pollution under the landfill. The ranges of infiltration rate and chloride ion concentrations in moisture entering the groundwater level under the landfill body obtained as a result of calculations of the water and mass balance of the landfill in Dubna were further used to calculate the chloride ion transport in groundwater.

Keywords: *groundwater, landfill body, leachate, pollution, moisture transport, migration, infiltration, concentration, numerical calculations, chloride ion*

REFERENCES

1. Grinevskii, S.O. [Modeling root water uptake when calculating unsaturated flow in the vadose zone and groundwater recharge]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2011, no. 3, pp. 189–201. (in Russian)
2. Grinevskii, S.O., Novoselova M.V. [Regularities in the formation of groundwater infiltration recharge]. *Vodnye resursy*, 2010, vol. 38, no. 2, pp. 175–186. (in Russian)
3. Sliusar, N.N., Vaisman, Ya.I., Korotaev, V.N. [The estimation of long-term emissions from municipal solid waste landfill-sites: the results of field studies and laboratory modeling]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2016, vol. 20, no. 4, pp. 32–39. (in Russian)
4. Alslaibi, T., Mogheir, Y., Afifi, S. Analysis of landfill components in estimating the percolated leachate to groundwater using the HELP model. *Water Science and Technology*. 2010, vol. 62, no. 8, pp. 1727–1734.
5. Al-Suraifi, A. Simulation of contaminants transport and groundwater flow for Basrah landfill site. *Engineering and technology journal*, 2017, vol. 35, no. 6, pp. 560–570.
6. Beck-Broichsitter, S., Gerke, H., Horn, R. Assessment of leachate production from a municipal solid-waste landfill through water-balance modeling. *Geosciences*, 2018, vol. 8, no. 10, pp. 372. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100372>
7. Cossu, R., Stegmann, R. Solid waste landfilling: concepts, processes, technology. 2019, 1174 p. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02435-0>
8. Fatta, D. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area. *Environmental Geochemistry and Health*, 1999, vol. 21, pp. 175–190.
9. Healy, R.W. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the US Geological Survey's computer program VS2D. *Water-Resources Investigations Report*, 1990, no. 90-4025. <https://doi.org/10.3133/wri904025>
10. Podlasek, A. Modeling leachate generation: practical scenarios for municipal solid waste landfills in Poland. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, vol. 30, no. (5), pp. 13256–13269.
11. Schroeder, R., Dozier, T.S., Zappi, P.A. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Engineering Documentation for Version 3, 1994, EPA/600/9-94/xxx, US Environmental Protection Agency Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, USA.
12. Yang, R., Xu, Z., Chail, J. A review of characteristics of landfilled municipal solid waste in several countries: physical composition, unit weight, and permeability coefficient. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, vol. 27, no. 6, pp. 2425–2435.
13. Zeng, D., Chen, G., Zhou, P., Xu, H. Factors influencing groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in the Qinghai-Tibetan plateau. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 211, 111913. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111913>

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 624.9

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО КОРОТКОБАЗИСНОГО ЦИФРОВОГО ДЕФОРМОМЕТРА С ПОМОЩЬЮ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СТЕНДА

© 2024 г. А. Б. Манукин^{1,2}, В. В. Тимков¹, В. В. Савосин², М. А. Гинзбург^{1,*}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, Москва, 123242 Россия

*E-mail: gimaal@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.08.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 05.02.2024 г.

В статье представлены результаты лабораторных испытаний деформометра короткобазисного цифрового (ДКЦ), разработанного для исследования деформационных процессов на трубопроводах и элементах инженерных конструкций, с изменениями, внесенными в его конструкцию и электронную часть, а также новая конструкция испытательного стенда. Представленные результаты показывают эффективность и точность новой методики проведения испытаний, что позволяет повысить достоверность получаемых результатов.

Ключевые слова: деформометр цифровой, динамический диапазон, чувствительность, крутизна преобразования, испытательный стенд

DOI: 10.31857/S0869780924020076; EDN: DZOPGG

Анализ результатов предварительных экспериментов с датчиком деформометра короткобазисного цифрового (ДКЦ) показал, что для улучшения результатов экспериментов по растяжению пластины подложки макета прибора необходимо внести доработки в электронную часть ДКЦ, а также изменить его конструкцию. Кроме того, предлагается переоборудовать испытательный стенд с переходом на вертикальный подвес.

В первую очередь это касается чувствительного элемента деформометра. Ранее с помощью емкостного преобразователя измерялось изменение площади перекрытия пластин измерительной емкости датчика [1]. Предыдущий образец ДКЦ представлен на рис. 1.

При проявлении деформационных процессов в пластине подложки, актуальным для проведения измерительных процедур является не оценка изменений площади перекрытия измерительной емкости, а точное определение величины изменения зазора между неподвижными пластинами (2), установленными на плате (3) емкостными преобразователями и измерительным кронштейном (1) (рис. 2).

В конструкцию ДКЦ были внесены изменения. Устройство было разделено на две платы для

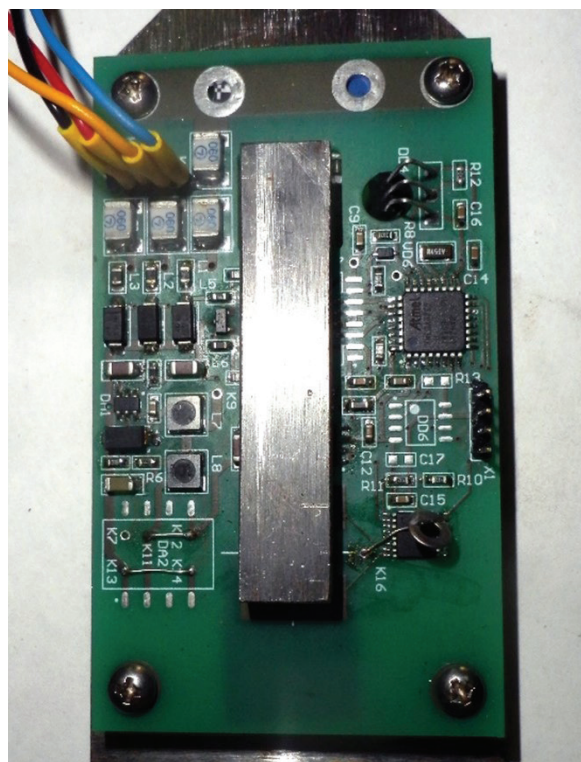


Рис. 1. Предыдущий образец ДКЦ [1].

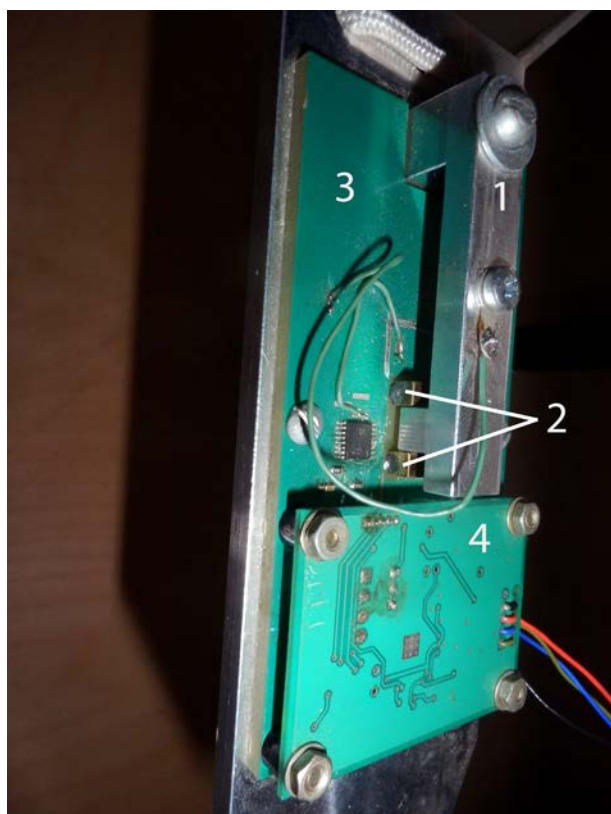


Рис. 2. Усовершенствованный вариант ДКЦ. 1 – Измерительный кронштейн, 2 – неподвижные пластины, 3 – плата емкостного преобразователя, 4 – плата контроллера.

минимизации паразитной емкости и исключения взаимного влияния на измерительную дифференциальную емкость. Такой подход позволяет получить более точные и надежные результаты измерений зазора между пластинами и измерительным кронштейном, что важно для эффективной работы прибора.

На первой плате (3, рис. 2) находятся неподвижные измерительные пластины, формирующие дифференциальную емкость, а также сама микросхема емкостного преобразователя. На второй плате (4, рис. 2) расположена цифровая часть. Плата (3) имеет выход на двухпроводной интерфейс I²C, который представляет собой последовательную асимметричную шину для связи между интегральными схемами внутри ДКЦ. По этому интерфейсу производится синхронный, полудуплексный обмен информацией от контроллера, расположенного на плате (4) и емкостным преобразователем, расположенным на плате (3).

Основная задача контроллера заключается в обработке данных, полученных от микросхемы емкостного преобразователя AD7745, а также в обмене информацией с внешними устройствами, например, с ноутбуком.

Применение микросхемы AD7745 емкостного преобразователя в электронной части ДКЦ позволило совместить высокую чувствительность и широкий динамический диапазон измерений при разных механических напряжениях. Она позволяет измерять изменение величины дифференциальной емкости и температуру с преобразованием в цифровой код, т.е. создавать электронные устройства с высокой точностью измерений и широкой областью применения.

Было изменено и крепление прибора в испытуемой конструкции: вместо постоянных магнитов, используемых в предыдущем варианте, было применено надежное винтовое соединение.

В новом варианте прибора производится измерения зазора между пластинами (2, рис. 2) и измерительным кронштейном (1, рис. 2), равному относительному изменению дифференциальной емкости, измеренному микросхемой AD7745. Это существенно облегчает построение прибора, поскольку крутизну преобразования определяет величина относительного изменения зазора (ξ) при смещении измерительного кронштейна на расстояние относительно неподвижных пластин при деформациях пластины подложки:

$$\xi = x/d, \quad (1)$$

где d – зазор между пластинами.

Была выбрана величина зазора между пластинами $d = 0.1$ мм, что позволило получить $\xi = 0.01$ при $x = 1$ мкм, тогда как в первом варианте устройства:

$$\xi = x/b,$$

где b – линейное перекрытие пластин, при $b = 2$ мм и $x = 1$ мкм, соответствующая величина $\xi = 0.0005$.

Одно из важных условий успешного проведения испытаний – уменьшение влияния таких паразитных эффектов, как элементы сухого трения при использовании неподвижного блока для натяжения пластины подложки. Эти эффекты могут вносить искажения в результаты испытаний, особенно при деформации пластины подложки. Поэтому для получения более точных результатов, необходимо учитывать их влияние и применять соответствующие методы уменьшения паразитных эффектов.

Для обеспечения большей чистоты экспериментов было принято решение отказаться от использования неподвижного блока [1]. Вместо этого, пластина вместе с деформометром была подвешена вертикально и растягивалась в вертикальном направлении при помощи грузов известной величины. Этот метод позволил уменьшить влияние паразитных эффектов на результаты эксперимента и получить более точные результаты.

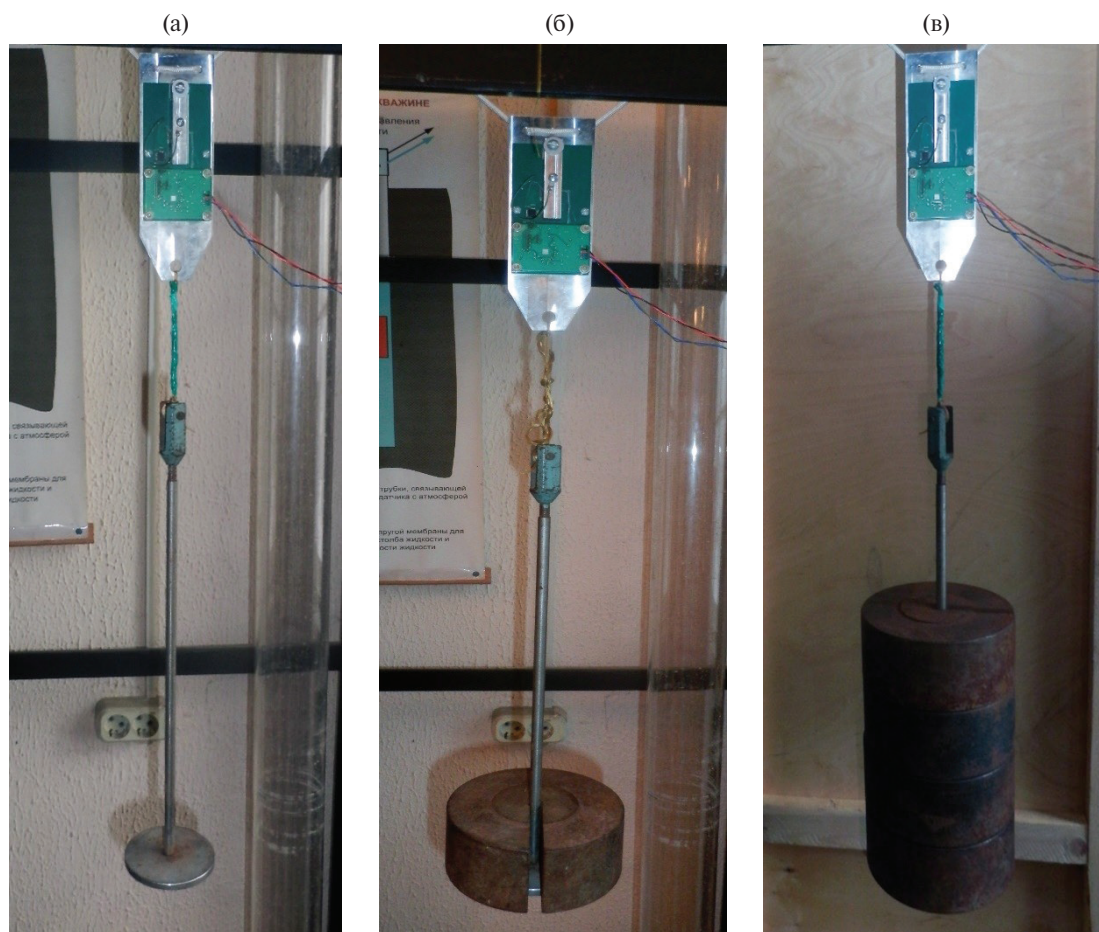


Рис. 3. Испытательный стенд ДКЦ Пластина: а – без нагрузки, б – с нагрузкой 4 кг, в – с нагрузкой 16 кг.

На рис. 3 представлены фотографии простой установки для измерения растягивания пластины. В центре установки находится пластина с установленным на ней деформометром, к которой прикреплен вертикальный стержень. На стержень последовательно нанизываются грузы с известной массой.

В основе испытаний деформометра лежали следующие ключевые условия:

1. *Установка:* деформометр должен быть правильно установлен и зафиксирован.

2. *Нагрузка:* на образец должна быть приложена известная нагрузка, которая может быть изменяемой во время испытания.

3. *Контроль условий:* важно обеспечить стабильные условия испытания, включая температуру, влажность, атмосферное давление и другие факторы, которые могут влиять на результаты эксперимента.

4. *Результаты:* информационные данные должны быть записаны на персональный компьютер с помощью специального программного обеспечения, разработанного сотрудниками ИГЭ РАН.

5. *Обработка данных:* после проведения испытаний необходимо правильно обработать полученные данные, провести анализ и интерпретацию результатов с использованием соответствующих методов и моделей.

Кроме того, для достижения более точных результатов может потребоваться повторить эксперимент несколько раз и вычислить средние значения. Это поможет уменьшить ошибку измерения и получить более надежные результаты.

Для проведения эксперимента на растяжение пластины подложки необходимо выполнить следующие действия:

1. Подготовить металлическую пластину подложки и закрепить деформометр на ней.

2. Надежно прикрепить стержень к пластине подложки и установить его в вертикальном положении.

3. Измерить начальное растяжение пластины подложки без груза (см. рис. 3а) и занести эту величину в таблицу результатов.

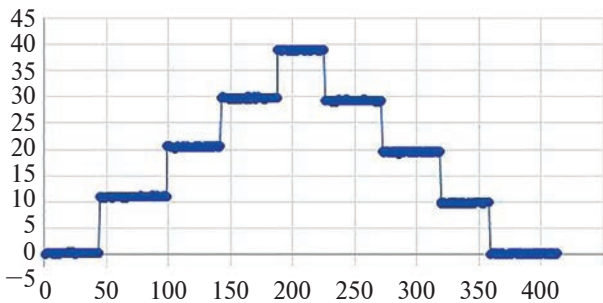


Рис. 4. График зависимости величины деформации пластины подложки от веса груза.

Ось абсцисс — число измерений за время проведения эксперимента, ось ординат — значения относительных изменений измеренной дифференциальной емкости по показаниям с микросхемы AD7745, т.е. значения деформаций пластины подложки в условных единицах АЦП при изменении нагрузки от 0 кг (без груза) до 16 кг с шагом 4 кг и обратно до 0 кг.

4. Прикрепить к пластине груз массой 4 кг (см. рис. 3б) и занести в таблицу показания деформометра.

5. Продолжать добавлять грузы массой по 4 кг (8, 12, 16 кг) и заносить соответствующие показания деформометра в таблицу.

6. После достижения максимальной нагрузки в 16 кг (см. рис. 3в) постепенно убирать грузы по 4 кг и заносить показания деформометра в таблицу.

7. По окончании эксперимента измерить растяжение пластины без груза и занести эту величину в таблицу результатов.

Общая продолжительность испытаний — 4 часа. Одновременно при испытаниях необходимо измерять температуру в помещении вблизи установки.

На основании этого эксперимента строится график (рис. 4), отображающий зависимость величины деформацией пластины подложки по показаниям емкостного преобразователя AD7745 от веса груза во времени.

Графики изменения средних значений температуры (ряд 1) и деформаций пластины подложки (ряд 2) во время проведения испытаний представлены на рис. 5.

Исходя из проведенного анализа данных и графика (см. рис. 5), можно сделать следующий вывод, что величина растяжения подложки увеличивается пропорционально весу груза, и несложно рассчитать изменение деформаций пластины подложки при изменении нагрузки на 4 кг.

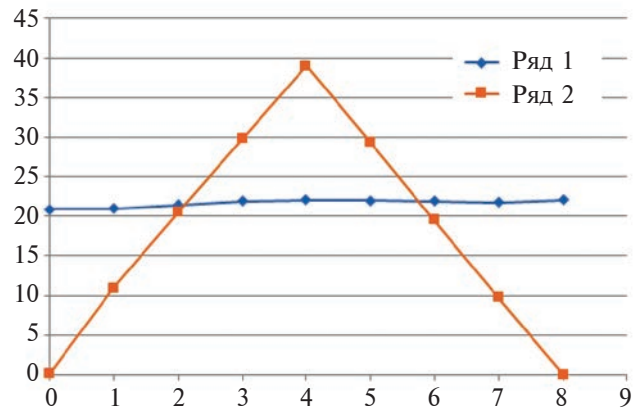


Рис. 5. Графики изменения средних значений температуры (ряд 1) и деформаций пластины (ряд 2) во времени. Ось абсцисс — ступени нагружения/разгрузки.

Значение деформации в каждой точке будем обозначать символом D_n , где n — номер измерения от 0 до 8, эти данные представлены в табл. 1.

Среднее значение изменения деформации $D_n - D_{(n-1)}$ от точки до точки на одинаковое изменение нагрузки равно 9.6335 условных единиц, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0.5482$. Существует вероятность, что симметричные по нагрузке точки деформации различаются по величине из-за воздействия изменений температуры, так как при повышении или понижении температуры материалы сжимаются или расширяются. В результате эти точки теряют свою симметрию и различаются по величине растяжений.

Для учета влияния изменений температуры введем символ D_n^* деформации в точке n . Новое значение D_n^* деформации в точке n будем определять из выражения:

$$D_n^* = D_n - k\Delta T/D_n,$$

где коэффициент k находится из условия равенства значений растяжений в симметричных по нагрузкам точкам, ΔT — разность температур T_n и T_0 .

Произведем расчет k , например, при условии $D_1^* = D_7^*$:

$$D_1^* = D_1 - k(T_1 - T_0)/D_1 = D_7^* = D_7 - k(T_7 - T_0)/D_7.$$

Подставляя значения из табл. 1, получаем $k = -13.8341$ и $D_1^* = D_7^* = 11.0171$.

Величины деформаций D_n^* после данной обработки и изменение деформации $Dn^* - D_{(n-1)}^*$, как отклик на изменение нагрузки на 4 кг с учетом вариации температуры, приведены в табл. 2. Среднее значение отклика от точки до точки на одинаковое изменение нагрузки равно 9.2143 условных единиц ($\sigma = 0.487$).

Таблица 1. Изменение деформации пластины подложки по данным с емкостного преобразователя при изменении нагрузки на пластину

Точка D_n	Значение в точке D_n	Отклик от точки до точки $D_n - D_{(n-1)}$	Нагрузка в точке D_n , кг	Температура в точке D_n , °C
0	0.1831		0	20.9097
1	10.9352	10.7521	4	20.9745
2	20.4757	9.5405	8	21.4434
3	29.8084	9.3327	12	21.9199
4	38.6601	8.8517	16	22.0890
5	29.3309	9.3292	12	21.9807
6	19.5185	9.8124	8	21.8953
7	9.7759	9.7426	4	21.7872
8	0.0695	9.7064	0	22.0544

Таблица 2. Изменение деформации пластины подложки, как отклик на изменение нагрузки с учетом вариации температуры

Точка D_n	Значение в точке D_n	Коэффициент k	Значение в точке D_n^*	Отклик от точки до точки $D_n^* - D_{(n-1)^*}$
0	0.1831			
1	10.9352	-13.8341	11.0171	
2	20.4757	-13.8341	20.8386	9.8215
3	29.8084	-13.8341	30.2770	9.4384
4	38.6601		38.6601	8.3831
5	29.3309	-13.8341	29.8358	-8.8243
6	19.5185	-13.8341	20.2171	-9.6187
7	9.7759	-13.8341	11.0171	-9.2000
8	0.0695			

График изменения средних значений деформаций пластины подложки с учетом вариаций температуры представлен на рис. 6. На этом графике значения растяжений пластины в симметричных по нагрузкам точках стали ближе по сравнению с данными, приведенными на рис. 5.

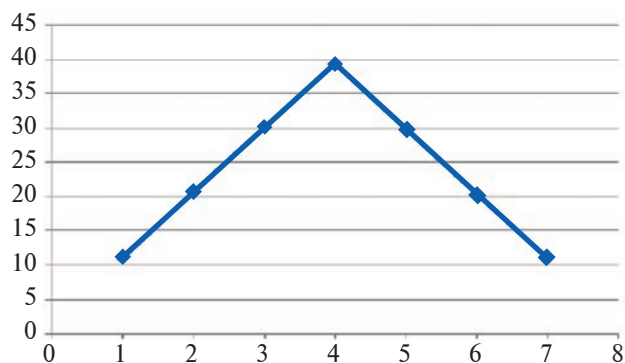
Деформация участка пластины подложки длины L при ее нагружении массой m составит величину:

$$\eta = x/L = mg/SE,$$

где g – ускорение свободного падения, S – площадь сечения растягиваемой пластины (2.5 см^2), E – модуль Юнга материала пластины (в эксперименте была использована пластина из дюраля с $E = 7.3 \times 10^{11} \text{ Н/см}^2$).

Результат вычислений показал, что при нагрузке пластины массой $m = 4 \text{ кг}$ величина η

составляет 2.1479×10^{-6} . Это соответствует смещению измерительного кронштейна на величину $x = 1.1 \times 10^{-5} \text{ см}$.

**Рис. 6.** График изменения средних значений деформаций пластины подложки с учетом вариаций температуры.

Среднее значение отклика на увеличение или уменьшение нагрузки на 4 кг составляет 9.2143 условных единиц ($\sigma = 0.487$). Это означает (см. (1)), что минимально обнаруживаемые деформации пластины в данном варианте прибора составят $\sim 10^{-7}$, что соответствует смещениям $x = 2 \times 10^{-7}$ см или 20 Å.

Одним из ключевых изменений в конструкции ДКЦ стало использование нового принципа измерения: вместо вариации площади перекрытия пластин измерительных емкостей, в емкостном преобразователе теперь измеряется изменение зазора между пластинами. Это изменение значительно повлияло на характеристики датчика, особенно на его крутизну преобразования.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что измерение деформации пластин при их нагружении может быть эффективным методом контроля в различных областях, связанных с механикой материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено созданное устройство деформометр короткобазисный цифровой (ДКЦ), позволяющий эффективно решать задачи, связанные с определением состояния трубопроводов

различного назначения. Кроме того, данное устройство может быть применено для мониторинга состояния металлоконструкций и обеспечения безопасности при критических нагрузках, вызывающих деформации.

Результаты исследования показали, что ДКЦ обладает высокой точностью и надежностью при проведении мониторинга, что делает его полезным инструментом для решения вышеупомянутых задач. Данное устройство может быть использовано в различных областях, связанных с мониторингом и контролем технических систем, где необходима высокая точность и надежность при проведении измерений.

В дополнение к этому было установлено, что новый датчик, выполненный на микросхеме AD7745 емкостного преобразователя, обладает более высокой надежностью и долговечностью по сравнению с предыдущей версией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манукин А.Б., Гинзбург А.А., Савосин В.В., Гинзбург М.А. Короткобазисный высокочувствительный цифровой деформометр для измерения деформаций на трубопроводах и элементах инженерных сооружений // Геоэкология. 2022. № 1. С. 77–84.

TEST RESULTS OF AN IMPROVED SHORT-BASELINE DIGITAL DEFORMOMETER USING A NEW BENCH DESIGN

A. B. Manukin^{a,b}, V. V. Timkov^a, V. V. Savosin^a, M. A. Ginzburg^{a,#}

^a*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b*Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya, 10, Moscow, 123242 Russia*

[#]*E-mail: gimaal@yandex.ru*

The article presents the results on laboratory tests of a short-baseline digital deformometer (SDC), developed to study deformation processes on pipelines and units of engineering structures, with the changes made to its design and electronic part, as well as the results of testing a new design of the test bench. The presented results show the effectiveness and accuracy of the new testing methodology, which makes it possible to increase the reliability of the results obtained.

Keywords: *digital strainmeter, dynamic range, sensitivity, conversion steepness, test bench*

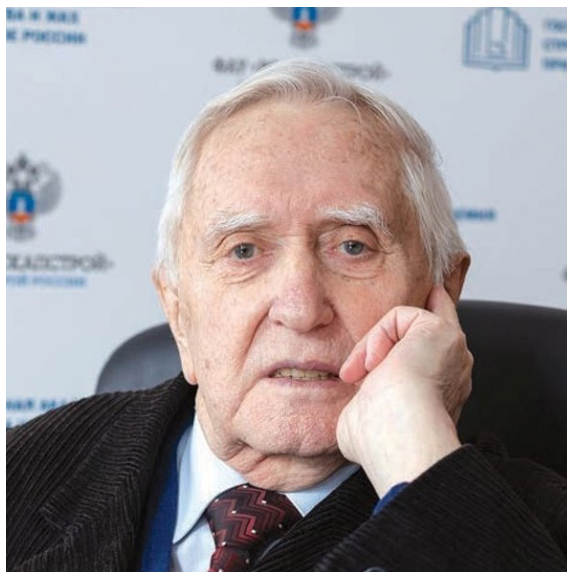
REFERENCES

1. Manukin, A.B., Ginzburg, A.A., Savosin, V.V., Ginzburg, M.A. [Short-base high-sensitivity digital deformometer for measuring deformations on pipelines and units of engineering structures]. *Geoekologiya*, 2022, no. 1, pp. 77–84. (in Russian)

ЛЮДИ НАУКИ

ЕВГЕНИЙ МЕРКУРЬЕВИЧ ПАШКИН

(к 90-летию)



30.12.2023 г. исполнилось 90 лет профессору Евгению Меркурьевичу Пашкину – выдающемуся и старейшему в России практикующему инженеру-геологу.

Евгений Меркурьевич Пашкин один из известных ученых в области инженерной геологии. Доктор геолого-минералогических наук, академик Академии Архитектурного наследия, заслуженный работник высшей школы и заслуженный деятель искусств РФ, почетный член ВООПИиК, член Тоннельной ассоциации России. Е.М. Пашкин на протяжении более чем 70-летней научной и практической деятельности активно развивает методологию инженерно-геологических исследований в туннелестроении и созданное им научное направление инженерной геологии – инженерно-геологическую диагностику деформаций памятников архитектуры.

Е.М. Пашкин родился 30 декабря 1933 г. в Москве и после окончания школы сразу поступил в Московский геологоразведочный институт, который успешно закончил в 1957 г. по кафедре инженерной геологии. Под руководством профессора Н.В. Коломенского защитил дипломный проект: “Оценка инженерно-геологических условий строительства Метромоста в Москве на Ленинских горах”. По распределению был направлен в институт “Метрогипротранс”, где до 1961 г. работал под руководством В.Ф.

Мильнера и К.В. Вакусевича – учеников и соратников Ф.П. Саваренского. Молодой специалист сразу включился в работу над очень серьезными проектами специальных подземных сооружений, принимал участие в инженерных изысканиях на трассах московского метрополитена: “Новые Черемушки” – “Беляево”, “Сокол” – “Речной Вокзал”, “Рижская – “ВДНХ”.

Знаковым событием этого периода было его участие в исследовании трассы коллектора р. Неглинка через Китай-город. Здесь Е.М. Пашкин впервые столкнулся с вопросами сохранения памятников архитектуры, попавшими в зону строительства коллектора. Тогда по его рекомендации была изменена первоначальная трасса коллектора таким образом, чтобы как можно меньше сказывалось негативное влияние строительства коллектора на сохранность памятников архитектуры Китай-города. Впоследствии это направление научной деятельности Евгения Меркурьевича занимает значительное место в его жизни. Он становится членом общественной организации “Всесоюзного общества охраны памятников истории и культуры” (ВООПИК), с 1969 г. по 1986 г. – членом Президиума, а с 1986 г. и до 2006 г. являлся заместителем председателя ВООПИК. За активную и плодотворную работу в деле сохранения архитектурного наследия Евгению Меркурьевичу было присвоено звание Почетного члена

ВООПИК, а в 1994 г. он был удостоен звания “Заслуженного деятеля искусств РФ”.

В 1961 г. Е.М. Пашкин переходит на работу в институт “Гидроспецпроект”. В то время в стране велось строительство крупных гидротехнических сооружений с туннельной деривацией, и головной институт “Гидроспецпроект” занимал ведущую роль в выполнении изысканий, проектирования и строительства гигантов советской энергетики. Сначала в качестве руководителя группы инженерно-геологических изысканий, а вскоре и главного геолога института Е.М. Пашкин принимал самое непосредственное участие в исследованиях и решении сложнейших инженерно-геологических задач при строительстве крупнейших гидротехнических подземных сооружений Нурекской, Токтогульской, Рогунской, Чарвакской, Вилуйской, Хантайской и многих других гидроэлектростанций страны.

Активная работа и высокая принципиальность инженера-геолога Е.М. Пашкина явились основанием для его избрания в 1964 г. депутатом Моссовета. А в 1970 г. талантливого беспартийного ученого, благодаря поддержке профессора И.В. Попова, впервые “выпустили” за границу на международную конференцию по скальным основаниям гидротехнических сооружений. На этой конференции в Белграде, Е.М. Пашкин сделал доклад об инженерно-геологических условиях строительства туннелей Нурекской ГЭС.

Богатый практический опыт, приобретенный Е.М. Пашкиным на натуральных исследованиях горного давления, структур скальных массивов горноскладчатых областей и реакций массивов горных пород на сооружение подземных выработок, нашел свое отражение в его кандидатской диссертации. Эта диссертационная работа была посвящена изучению влияния трещиноватости на устойчивость пород в туннелях Нурекской ГЭС, выполнена под научным руководством Н.В. Коломенского и успешно защищена в 1968 г. В продолжение этой тематики в 1981 г. на основе значительного фактического материала, полученного при строительстве гидротехнических туннелей, Евгений Меркурьевич защитил докторскую диссертацию на тему “Теория и практика прогноза и управления устойчивостью горных пород при строительстве подземных сооружений (на примере горноскладчатых областей). В этих работах Е.М. Пашкиным на основе системно-структурного подхода были впервые разработаны теоретические положения прогноза устойчивости пород в подземных выработках и способы управления устойчивостью с помощью адаптивных функций сферы взаимодействия.

С 1970 по 1975 г. Евгений Меркурьевич совмещает работу главного геолога в “Гидроспецпроекте” с преподаванием в Московском

геологоразведочном институте (ныне Российский государственный геологоразведочный университет) на кафедре инженерной геологии. В 1975 г. он окончательно переходит на работу во МГРИ сначала в качестве доцента кафедры, совмещая с работой заместителя декана гидрогеологического факультета, а в 1981 г. становится профессором кафедры. С 1986 г. до 1991 г. Е.М. Пашкин был деканом гидрогеологического факультета, с 1991 г. по 2002 г. — заведующим кафедрой инженерной геологии. В это время по его инициативе кафедре было присвоено имя ее основателя — академика Ф.П. Саваренского. Тогда же под руководством Е.М. Пашкина на кафедре впервые были проведены чтения, посвященные памяти академика Ф.П. Саваренского — основоположника отечественной инженерной геологии и гидрогеологии. В 2003 г. Е.М. Пашкин в соавторстве с Т.Ф. Саваренской — дочерью Федора Петровича, написал и книгу о Федоре Петровиче Саваренском.

Работа со студентами всегда увлекала Е.М. Пашкина и заставляла искать новые формы педагогического процесса. Он организовывал научные экскурсии студентов на крупные гидротехнические сооружения: на Нурекскую, Копчагайскую, Плявинскую и Ингурскую ГЭС, а также ознакомительные экскурсии студентов по историческим городам Русского Севера. При кафедре был создан первый научный студенческий отряд, который на протяжении нескольких лет вел научно-исследовательскую работу на территории Кирилло-Белозерского монастыря.

Параллельно с преподаванием во МГРИ-РГГРУ Е.М. Пашкин читал курс лекций по инженерно-геологической диагностике причин деформаций памятников архитектуры в Российском институте искусства реставрации. Для этого курса им был подготовлен учебник “Инженерная геология (для реставраторов)”, изданный издательством “Архитектура-С” в 2005 г.

В 1998 г. при кафедре по инициативе Е.М. Пашкина создается проблемная лаборатория “Инженерная геология исторических территорий”, которая силами сотрудников, преподавателей и студентов успешно осуществляет научно-практическую деятельность по настоящее время. В том же году на кафедре инженерной геологии Евгений Меркурьевич Пашкин создал новую специализацию “Инженерно-геологические исследования для сохранения и реставрации памятников архитектуры”, новые курсы и новые учебные практики.

Е.М. Пашкин впервые разработал основы теории инженерно-геологической диагностики деформаций инженерных сооружений на примере исторических природно-технических систем. Они были изложены в первой на эту тему монографии Е.М. Пашкина “Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры”,

изданной в 1998 г., которая разошлась большим тиражом и служила незаменимым пособием для специалистов, работающих в области реставрации, и переиздавалась 4 раза.

Е.М. Пашкин подготовил и выпустил плеяду квалифицированных специалистов, которые работают по всей территории бывшего Советского Союза и за рубежом. Под его руководством защищено 19 кандидатских диссертаций. За успешную педагогическую деятельность в 1998 г. он был удостоен звания “Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации”.

В период с 1969 г. и до распада СССР Е.М. Пашкин был членом научно-методического и экспертного советов Министерства культуры СССР, председателем ряда экологических экспертиз бывшего Совета Министров СССР, Госплана СССР, Госстроя, Минтрансстроя и Министерства культуры. В последующие годы он регулярно участвовал в качестве эксперта в работе Экспертных комиссий Министерства культуры Российской Федерации. Им составлено более 200 экспертных заключений по инженерно-геологическим условиям строительства различных сооружений (гидротехнических, подземных, ирригационных, памятников архитектуры и др.), в том числе с целью выявления причин аварийных ситуаций.

С 1978 по 1986 г. Е.М. Пашкин участвовал в работе четырех правительственных экспертных комиссий (являясь председателем одной из них), рассматривавших проект переброски части стока северных рек в бассейн Каспийского моря. Благодаря работам этих комиссий проект переброски была отменен.

С 1985 г. Е.М. Пашкин являлся членом экспертной комиссии и входил в состав научно-методического совета Министерства культуры РФ, которая занимается вопросами рассмотрения проектов реставрации памятников архитектуры, истории и культуры, а также реконструкции исторических территорий, реализация которых связана с решением комплекса инженерно-геологических и гидрогеологических задач.

В 1990 г. с момента образования Всесоюзной ассоциации туннельщиков (с марта 1999 г. она зарегистрирована в качестве Туннельной ассоциации России) Е.М. Пашкин стал одним из первых её членов. Участвовал в экспертизе проектов туннелей Кавказкой перевальной железной дороги, туннелей БАМа и метрополитена в г. Казань и г. Нижний Новгород, туннеля под Беринговым проливом, а также выезжал для консультаций по проектированию и строительству туннелей в Перу, Иране и на Кипре.

В конце 1990-х гг. Е.М. Пашкин участвовал в экспертизе уникального туннеля в Лефортово, в Москве, а в начале 2000-х годов был членом приемной комиссии отреставрированного здания Манежа и построенного подземного комплекса на Манежной площади. Он участвовал также в выработке инженерных решений по устройству подземной части Большого театра и в экспертизе проекта его реставрации.

В течение многих лет Е.М. Пашкин является членом Общественного фонда “Центр качества строительства” при Госстрое России, образованного в 1996 г. по инициативе Госархстройнадзора России в целях оказания помощи в деле повышения уровня качества строительства в Российской Федерации.

Е.М. Пашкин с 1987 г. являлся членом редакционной коллегии научного журнала РАН “Инженерная геология”, а после его переименования в 1992–2015 гг. членом редколлегии журнала “Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология”.

С 2019 г., после ухода из МГРИ, Евгений Меркурьевич работает экспертом в центре сохранения объектов культурного наследия ФАУ “РосКап-Строй”, где ведёт активную педагогическую и научную деятельность.

Е.М. Пашкин опубликовал более 240 научных работ, в том числе 12 монографий. Знаменательно, что в последние годы им подготовлены и изданы три крупные монографические работы – своеобразный научный триптих. В 2011 г. под редакцией Е.М. Пашкина издан уникальный Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии, а в 2013 г. второе издание исправленной и дополненной монографии “Инженерно-геологические исследования при строительстве туннелей”. В 2022 г. вышло четвёртое издание книги “Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры”, которая получила диплом Союза архитекторов России на V Всероссийском архитектурном фестивале “Архитектурное наследие 2022” в номинации “Лучшее учебное пособие об архитектурном наследии”. В 2023 г. в свет вышла монография “Синергетика в инженерной геологии”.

Поздравляя Евгения Меркурьевича со славным юбилеем, коллеги, ученики и редколлегия журнала “Геоэкология” искренне желают ему крепкого здоровья, неизменной творческой активности, постоянной востребованности строительным комплексом страны, новых успехов в научной, педагогической и общественной деятельности.

Редколлегия, коллеги и ученики