

ISSN 0869-7809

Номер 1

Январь - Февраль 2023



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2023

Неоструктурное районирование Российской части центрального сегмента мегасвода Большого Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий)

С. А. Несмеянов, О. А. Воейкова, М. Н. Комаревская

3

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Опыт структурно-геодинамических исследований территорий размещения атомных станций в целях оценки устойчивости сооружений

Н. В. Макарова, В. М. Макеев, Т. В. Суханова, П. С. Микляев

21

Природные процессы как факторы обоснования решений по портовым гидротехническим сооружениям

И. Г. Кантаржи, А. В. Куприн

34

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Сравнительная оценка трех способов расчета диаметра карстово-обвального провала “простого” типа

В. П. Хоменко, М. В. Леоненко, А. О. Дзуцев

41

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Поведение тяжелых металлов в системе “почва—конденсат—растения” на объектах размещения отходов г. Улан-Удэ

Т. В. Чередова, С. Г. Дорошкевич, С. В. Бартанова

50

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Выщелачивание загрязняющих веществ из захороненных продуктов механико-биологической обработки отходов в полномасштабных экспериментах

Т. И. Юганова

59

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Подходы к изучению влияния газовой составляющей на механические свойства мёрзлых грунтов

А. Н. Хименков, Е. О. Дернова, Ю. В. Станиловская

76

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Система оценки и охраны компонентов геосреды от техногенных воздействий залежей углеводородов

К. Л. Чертес, О. В. Тупицына, Е. Н. Петренко

87

ХРОНИКА

Сергей Алексеевич Несмеянов (к 90-летию со дня рождения)

95

Contents

Number 1, 2023

Neostuctural zoning of the Russian part of the Greater Caucasus megavault,
the central segment (advanced studies for engineering survey)

S. A. Nesmeyanov, O. A. Voeikova, and M. N. Komarevskaya

3

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Experience in geostructural and geodynamic investigations of nuclear power plant
allocation territories for assessing stability of engineering structures

N. V. Makarova, V. M. Makeev, T. V. Sukhanova, and P. S. Miklyaev

21

Natural processes as justification factors for decisions on port hydraulic structures

I. G. Kantarzhni and A. V. Kuprin

34

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

Comparison of three approaches to calculating diameter of a dropout sinkhole

V. P. Khomenko, M. V. Leonenko, and A. O. Dzutsev

41

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Behavior of heavy metals in soil-condensate-plants system in the Ulan-Ude landfills

T. V. Cheredova, S. G. Doroshkevich, and S. V. Bartanova

50

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTES

Leaching of contaminants from buried products of mechanical-biological waste
treatment in large-scale experiments

T. I. Yuganova

59

SOIL AND ROCK ENGINEERING AND MECHANICS

Approaches to studying the effect of gas component on the mechanical properties
of frozen soils

A. N. Khimenkov, E. O. Dernova, and Yu. V. Stanilovskaya

76

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Assessment and protection of geoenvironment components from impacts produced
by technogenous hydrocarbon deposits

K. L. Chertes, O. V. Tupitsyna, and E. N. Petrenko

87

CHRONICLE

Sergei Alekseevich Nesmeyanov (to the 90th birthday)

95

УДК 551.248.2 (224.91)

НЕОСТРУКТУРНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА БОЛЬШОГО КАВКАЗА (опережающие исследования для инженерных изысканий)

© 2023 г. С. А. Несмеянов¹, О. А. Воейкова^{1,*}, М. Н. Комаревская¹

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

*E-mail: voa49@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2022 г.

После доработки 17.10.2022 г.

Принята к публикации 02.11.2022 г.

Инженерные изыскания на территории новейших орогенов или их крупных частей целесообразно предварять детальным неоструктурным районированием с типизацией тектонических структур. Проведенное среднемасштабное неоструктурное районирование Центрального сегмента мегасвода Большого Кавказа показало значительную сложность строения выделявшихся ранее региональных неотектонических структур. На западе сегмента расположена поперечная Пшехско-Адлерская шовная зона. К ней примыкают три продольные структуры: осевое поднятие срединной зоны, к северу от которой располагается Лабино-Малкинская моноклираль, а к югу — Абхазо-Сванетская ступень. Срединная зона обрамлена узкими шовно-депрессийными структурами: с севера Пшекиш-Тырныауской, а с юга — Мзымтинской. Установлены значительные различия в дифференцированности неотектонического (позднеорогенного) структурного плана разных частей сегмента: меньшая дифференцированность на его севере и востоке и большая — на юге и западе. Показана существенная перестройка всех региональных шовных зон древнего заложения и для новейших локальных блоковых и разрывных структур, связанных с орогеническим воздыманием. Новейшие структуры принципиально отличаются от более древних структур, формировавшихся в иной тектодинамической обстановке с преобладанием горизонтального сжатия. Как правило, именно доновейшие структуры картируют здесь при геологической съемке. Поэтому для территории Кавказского орогена, в том числе и для его Центрального сегмента, неотектонические карты не представлены в подавляющем большинстве опубликованных материалов по листам геологических карт масштаба 1: 200 000. Выделение локальных неотектонических структур имеет принципиальное значение для повышения качества различных прикладных исследований, в том числе при проведении инженерных, гидрогеологических и геоэкологических изысканий для строительного проектирования.

Ключевые слова: ороген, мегасвод, сегмент, зона, шовная зона, горст, грабен, ступень, разрыв

DOI: 10.31857/S0869780923010083, **EDN:** HXJBEI

ВВЕДЕНИЕ

Детальное, в том числе среднемасштабное неотектоническое районирование является важным элементом инженерной геотектоники [12] и используется в различных прикладных и научных исследованиях, например, палеоэкологических [11]. Такое районирование служит, как правило, основой, т.е. исходной схемой для качественного инженерно-геологического, гидрогеологического, геоэкологического и сейсмического районирования, и должно опережать эти исследования, обычно входящие в состав инженерных изысканий. Особенно необходимо оно в горных областях, где большинство орографических элементов, даже небольших, отвечает самостоятельным неотектоническим структурам. Поэтому проведе-

ние такого районирования целесообразно на территории новейших орогенов или их крупных частей, что особенно важно для районов перспективного хозяйственного освоения. Одним из таких районов является Центральный Кавказ, который обычно рассматривается в качестве самостоятельного сегмента мегасвода Большого Кавказа.

ОСНОВНЫЕ НЕОСТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО СЕГМЕНТА МЕГАСВОДА

В Центральном сегменте новейшего мегасвода Большого Кавказа традиционно выделялись три крупнейшие продольные структуры: осевое поднятие срединной зоны, к северу от которой располагалась Лабино-Малкинская моноклираль, а

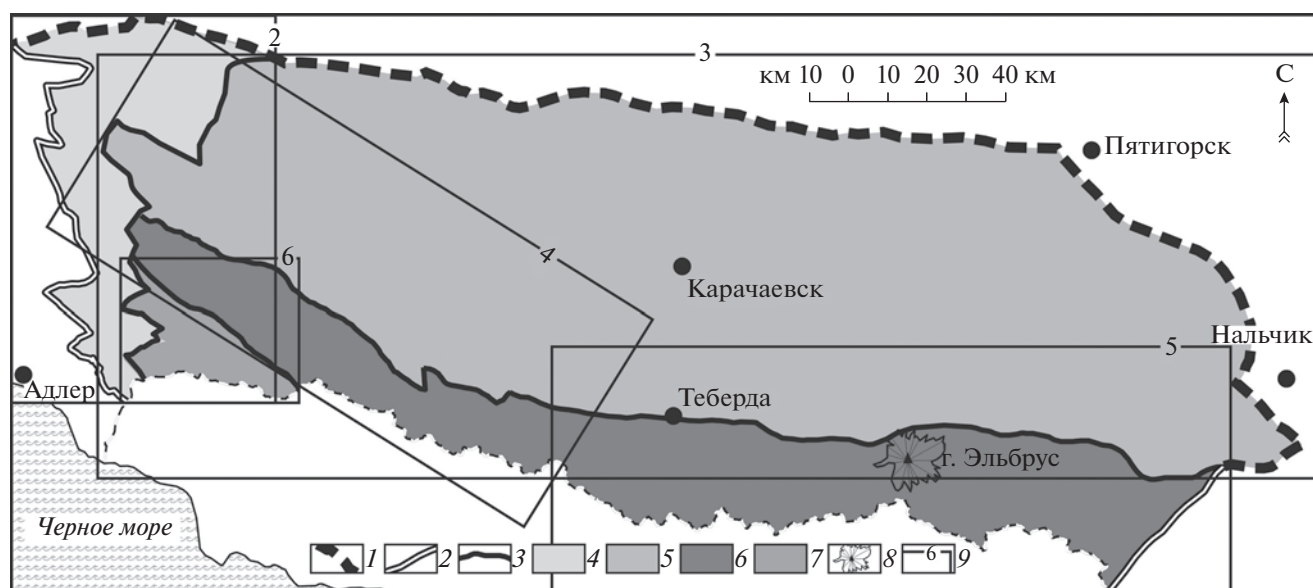


Рис. 1. Схема неоструктурного районирования Российской части Центрального сегмента Мегасвода Большого Кавказа: 1–3 – границы: 1 – Мегасвода Большого Кавказа, 2 – сегментов мегасвода, 3 – зон; 4–7 – зоны: 4 – Пшехско-Адлерская, 5 – Северного ступенчатого склона (Лабино-Малкинская), 6 – Срединная, 7 – Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетская); 8 – вулкан Эльбрус, 9 – контуры участков, показанных на рис. 2–6, и их номера.

к югу – Абхазо-Сванетская ступень [10]. Однако постепенно обозначилась важная роль западной фронтальной Пшехско-Адлерской зоны, ограничивающей все три упомянутые продольные зоны с запада (рис. 1).

Установлено, что **новейшая Пшехско-Адлерская зона**, которую ранее считали региональной флексурой [10], представляет собой широкую и закономерно построенную полосу развития поперечных и диагональных к оси мегасвода разрывов и блоков [13]. В ее пределах исчезает продольная структурная зональность, свойственная западному и основной части Центрального сегментов мегасвода.

От Западного сегмента эту зону отделяет крупный сбросовый уступ, к востоку от которого располагаются фронтальные поднятия и тыловые грабены. Общая ширина Пшехско-Адлерской зоны достигает 60 км на севере, примерно до 15 км суживается в центре и затем вновь увеличивается до 50 км. Но далее на юг она опять резко суживается при сочленении с подходящей с запада Воронцовской шовно-блоковой зоной [15]. В пределах Абхазии она уже представлена, по существу, единой линией флексур и малоамплитудных сбросов, которая служит продолжением западного орографически выраженного сбросового уступа [11].

Зона Северного ступенчатого склона (Лабино-Малкинская) неоднородна. По мере удаления к востоку от Пшехско-Адлерской зоны интенсивность глыбового дробления снижается. При этом многие сочленения блоковых структур становятся сначала флексурно-разрывными, а затем и просто флексурными. Да и сам восточный борт

мегасвода в пределах этой зоны обусловлен широкой региональной Нальчикской флексурой.

Срединная зона представлена относительно узкой полосой наиболее высоких горстов. На их сочленениях местами формируются узкие грабены, что свидетельствует о преобладании растяжений в процессе новейшего орогенеза. В этой зоне наблюдается постепенное укрупнение блоковых структур к востоку.

Зона Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетская) попадает на территорию Российской Федерации своей незначительной западной частью. Она характеризуется “клавишным” чередованием цепей грабенов и гряд горстов.

Границами основных продольных зон Центрального сегмента служат Пшекиш-Тырныаузская и Мзымтинская шовно-депресссионные зоны [13, 30].

Основные новейшие структуры Центрального сегмента имеют сложное строение, определяющееся иерархией как блоковых (табл. 1), так и разрывно-флексурных структур (табл. 2).

Специфика тектонического строения Центрального Кавказа по отношению к Западному и Казбекскому сегментам Мегасвода Большого Кавказа в значительной мере объясняется высоким положением жесткого палеозойского фундамента. Он в ряде тектонических зон выходит на поверхность или залегает на небольшой глубине. Поэтому здесь, особенно в приосевой зоне, явно проявляются глыбовые структуры и системы глубинных разломов [10].

Существующие различия в морфологии выделяемых структур объясняются неодинаковой

Таблица 1. Блоковые структуры

№	Название	Тип	№	Название	Тип
1–7	Пшехско-Адлерская зона		7д-2	Галионовая	грабен-ступень
1	Северная группа блоков		7е-1	Кепшинский	грабен
1а	Хокодзинская	ступень	7е-2	Кешский	—“—
1б	Баранчиковская	—“—	8–19	Зона Северного ступенчатого склона (Лабино-Малкинская)	
1в	Каменноостская	—“—	8	Ачигоховская перемычка	
2а	Сапунская	горст-ступень	9	Гряда горстов Пастбищного хребта (Пастбищно-Джизальский горст)	
2б	Западнодаховская	седловина	10	Шедокско-Кабардинская цепь впадин	
3	Гуамский	горст	10а	Шедокская	ступень
4	Восточнодаховский	—“—	10б	Тегин-Джегутинский	грабен
5	Гряда западных фронтальных горстов		10в	Кабардинская	грабен-ступень
5а	Матазыкская	горст-ступень	10г	Нижнечегемская	ступень
5б	Лагонакский	горст	11	Гряда горстов Скалистого хребта	
5в-1	Нагойчукский	—“—	11а	Андрюкская	горст-ступень
5в-2	Каменноморская	горст-ступень	11б	Джангурский	горст
5в3	Холодного родника	—“—	11в	Скалистого хребта	—“—
5г	Мессоуская	горст-ступень	12	Псебай-Бечасынская цепь грабенов	
5д	Верхнецицинский	грабен	12а	Псебай-Карачаевский	грабен
5е-1	Оштенский	горст	12б	Бечасынская	грабен-ступень
5е-2	Пшехосуйская	горст-ступень	13	Тхачская гряда горстов	
5е-3	Фиштская	—“—	13а	Корытинская	горст-ступень
5е-4	Южнофиштская	высокая ступень	3б	Бульварная	ступень
5ж-1	Кутский	горст	13в	Большетхачский	горст
5ж-2	Иегошская	горст-ступень	13г	Бабукская	ступень
5з	Амукский	горст	13д	Сундукинский	горст
5и-1	Никаноровская	горст-ступень	13е	Бугунджинская	грабен-ступень
5и-2	Сапунский	горст	13ж	Полковая	ступень
5к-1	Ахцуйский	—“—	13з	Никитинская	высокая ступень
5к-2	Высокий	—“—	14	Хамышкинско-Бекесская цепь грабенов	
5к-3	Восточновысокинская	горст-ступень	14а	Хамышкинский	грабен
5л	Глубокоярский	грабен	14б	Кишский	—“—
5м-1	Западноглубокоярская	ступень	14в	Северобамбацкая	перемычка
5м-2	Дзыхринский	горст	14г	Уруштенский	Грабен
5м-3	Южнодзыхринская	горст-ступень	14д	Устьуруштенский	—“—
5м-4	Цхистинская	высокая ступень	14е	Бекесский	—“—
6	Мезмай-Дудугушская группа ступеней		15	Бахмутско-Ацгарский ступенчатый склон	
6а	Мезмайская	высокая ступень	15а	Бахмутская	ступень
6б	Дудугушская	ступень	15б	Рожжаосская	—“—
6в	Бзыкская	грабен-ступень	15в	Ацгарская	—“—
7	Группа тыловых грабенов		16	Инженерно-Бамбацкая гряда горстов	
7а	Новопротладненский	грабен	16а	Инженерная	орст-ступень
7б-1	Скаженная	грабен-ступень	16б	Пшекишская	—“—
7б-2	Восточнобзыкский	грабен	16в	Бамбацкий	горст
7б-3	Устьберезовый	—“—	17	Балкано-Абиширская гряда горстов	
7в-1	Североачишхинская	грабен-ступень	17а	Балканская	горст-ступень
7в-2	Верхнечвижепсинский	грабен	17б	Мастаканская	ступень

Таблица 1. Окончание

№	Название	Тип	№	Название	Тип
7в-3	Портартурская	грабен-ступень	17в	Абиширский	горст
7в-4	Медовеевская	—“—	17г	Верхнеархызская	ступень
7г	Чвижепсинский	грабен	17д	Старожилишная	—“—
7д-1	Устьчвижепсинский	—“—			
18	Эльбашинская гряда горстов		23д	Мусатчерийская	горст-ступень
18	Эльбашинский	горст	23е	Алибек-Домбайский	грабен
19	Пишекиш-Тырнаузская шовно-депресссионная зона		23ж	Северокуршинская	высокая ступень
19а	Гузерицпльский	грабен	23з	Куршоуская	горст-ступень
19б	Козлиный	—“—	23и	Западноэльбрусская	—“—
19в	Аспидная	перемычка	23к	Эльбрусская	—“—
19г	Аспидный	грабен	23л	Нижнечиринкольская	седловина
19д	Алоусский	—“—	23м	Куршинский	горст
19е	Ачипстинский	—“—	23н	Даут-Верхнекубанский	грабен
19ж	Умпырская	перемычка	23п	Азауская	горст-ступень
19з	Загеданский	грабен	23р	Далар-Верхнебаксан-ский	грабен
19и	Архызский	—“—	24	Зона Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетская)	
19к	Тебердинский	—“—	24	Мзымтинская цепь шовных грабен	
19л	Шаукольский	—“—	24а	Ачипсинский	грабен
19м	Северотырнаузский	—“—	24б	Нижнелаурская	грабен-ступень
19н	Тырнаузский	—“—	24в	Псекоховская	—“—
20–23	Серединная зона высокоподнятых горстов		24г	Нижнепслухская	—“—
20	Чугушская гряда горстов		24д	Этосадокий	грабен
20а	Абагская	ступень	24е	Долгинский	—“—
20б	Чугушский	горст	24ж	Бзычский	—“—
20в	Верхнекишская	седловина	25	Ачишхинская группа блоков	
20г	Псеашхинский	горст	25а	Ачишхинский	горст
20д	Ассаринская	горст-ступень	25б	Хмелевский	—“—
20е	Южнопсеашхинская	—“—	25в	Южноачишхинская	ступень
20ж	Аишхинская	—“—	25г	Западнобешенская	горст-ступень
20з	Южноассаринская	высокая ступень	25д	Бешенский	грабен
20и	Южноаишхинская	ступень	25е	Южнохмелевская	ступень
20к	Санчаринская	седловина	26	Аибгинская гряда горстов	
21	Софийско-Эрцогская гряда горстов		26а	Аибгинский	горст
21а	Аркасаринская	горст-ступень	26б	Верхнержаная	ступень
21б	Софийский	горст	26в	Североаибгинская	—“—
21в	Эрцогский	—“—	26г	Южноаибгинская	—“—
22	Нахарско-Верхнечегемская гряда горстов		26д	Западноагептская	горст-ступень
22а	Нахарский	горст	26е	Агептский	горст
22б	Верхнечегемский	—“—	27	Пихтовая группа блоков	
22в	Эльтюбюнская	ступень	27а	Пихтовый	горст
23	Эльбрусская клавишная система блоков		27б	Верхнегалионовая	высокая ступень
23а	Кышкаджерский	горст	27в	Североподковная	ступень
23б	Хатигорский	—“—	27г	Верхнеарквинская	—“—
23в	Бадукская	горст-ступень	27д	Верхнепсоуский	грабен
23г	Клухорский	грабен			

Таблица 2. Разрывные структуры

Номер	Название	Тип	Номер	Название	Тип
1	Кредянский	сброс	35	Южнохамышкинский	сброс
1а/4а*	Шпильская	флексура	36	Южнокишский	—“—
2/12в	Волчьих ворот	сброс	37	Южнорожкаоский	—“—
2а/4б	Самурский	—“—	38	Филимоновский	—“—
3/12б	Северогумский	—“—	39	Устькишский	—“—
3а	Востоногуамский	—“—	40	Мордовский	—“—
3б	Руфабовский	—“—	41	Востонобамбакский	—“—
3в	Западнодаховский	—“—	42	Востоноуруштенский	—“—
4	Баракаевская	флексура	43	Джентуский	—“—
5	Умрихинский	сброс	44	Североархызский	—“—
5а	Бачуринская	флексура	45	Южноацгаринский	—“—
5б	Устьдзегутинская	—“—	46	Старожилишный	—“—
6	Кисловодский	сброс	47	Верхнетебердинский	—“—
7а	Южношедокская	флексура	48	Северомастаканский	—“—
7б	Южнотегинская	—“—	49	Архызский	—“—
7в	Эмуркайская	—“—	50	Марухский	—“—
8	Южногуамский	сброс	51	Южноэльбашинский	—“—
9	Ахметовский	—“—	52	Былымский	—“—
9а	Лысая	флексура	52а	Кашхатауская	флексура
10а	Лахрановская	—“—	53	Тырныаузский	сброс
10б	Бедыкская	—“—	54	Мурзикальская	флексура
11	Нальчиковский	сброс	55	Востономессоуский	сброс
11а	Нальчикская	флексура	56	Западноагойчукский	—“—
12/13в	Западноматазыкский	сброс	57	Абадзешская	флексура
13/13а	Южноматазыкский	—“—	58	Северооштенский	сброс
14	Востонолагонакский	—“—	59/36	Фиштский	—“—
15/38а	Западнолагонакский	—“—	60	Востонооштенский	—“—
16/38	Агуловско-Верхнецицинский	—“—	61а	Западнооштенский	—“—
17	Цербелевский	—“—	61б	Пшехосуйский	—“—
18	Буреломная	флексура	61в	Южнофиштский	—“—
19	Западнокорытинский	сброс	62	Бзышский	—“—
19а	Западноачхокская	флексура	63	Востоночурский	—“—
20	Востоноачхокский	сброс	64	Бзыкский	—“—
20а	Востоноачхокская	флексура	65	Иегошский	—“—
20б	Казачья	—“—	65а	Западночвижепсинский	—“—
21	Псебайский	сброс	65б	Верхнечвижепсинский	—“—
22	Северокорытинский	—“—	66	Бирюкинский	—“—
22а	Курджиновская	флексура	67	Чвижепсинский	—“—
23	Бугунджинский	сброс	68	Северомзымтинский	сбросо-взброс
24	Бурный	—“—	68а	Аишховский	сброс
25	Слесарненский	—“—	68а-1	Южноассаринский	—“—
26	Колокольненский	—“—	68б	Псеашхинский	надвиг
27	Востонотхачский	—“—	68в	Среднелаурский	сброс
28	Малобабукский	—“—	68г	Южнопсекохский	—“—
28а	Малобамбакская	флексура	68д	Карзаковый	—“—

Таблица 2. Окончание

Номер	Название	Тип	Номер	Название	Тип
29	Ачешбокский	сброс	68е	Тихинский	—“—
30	Северохамышкинский	—“—	69/77а	Североамукский	—“—
31	Южнобамбакский	—“—	70	Западноашишхинский	—“—
32	Южнобекесский	—“—	71	Североашишхинский	—“—
33	Белоскальный	—“—	72	Устьслухский	—“—
34	Северочапаловский	—“—	72а	Этосадовский	—“—
73	Южноашишхинский	сброс	99	Хаджибейский	сброс
73а	Верхнемедовеевский	—“—	99а	Верхнеузункольский	—“—
73б	Круглополянский	—“—	99б	Куршанский	—“—
73в	Северобешенский	—“—	99в	Западнокышкарджерский	—“—
73г	Южнобешенский	—“—	99г	Верхнедаудский	—“—
74	Чхалтинский	—“—	99д	Узункольский	—“—
74а	Североаибгинский	надвиг	99е	Кюкюртлюйский	—“—
74б	Каменностолбовой	сброс	99ж	Куршоуский	—“—
74в	Туриный	—“—	100	Итколбашинский	—“—
74г	Западноагепстский	—“—	101	Южнотебердинский	—“—
75	Мзымтинский	—“—	101а	Кюйгенкаинский	—“—
76	Южномзымтинский	—“—	102	Чиринкольский	—“—
76а	Северогалионовский	—“—	102а	Верхнебаксанский	—“—
76б	Среднегалионовский	—“—	102б	Терскольский	—“—
76в	Верхнегалионовский	—“—	103	Клухорский	—“—
77/77	Кепшинский/Кичмай-Бзычский	—“—	103а	Северомусатчерский	—“—
77а	Востококешский	—“—	104	Южнодомбайский	—“—
77б	Арквапихтинский	—“—	104а	Домбайский	—“—
77в	Восточнониканоровский	—“—	105	Марухбашинский	—“—
90	Североабагский	—“—	106	Агепстский	—“—
90а	Западноаспидный	—“—	107	Южноаибгинский	—“—
90б	Востоочноаспидный	—“—	108	Верхнепсоуский	—“—
90в	Алоуский	—“—	110	Северодзыхринский	—“—
90г	Западноумпырский	—“—	110а	Глубокоярский	—“—
90д	Востоочноумпырский	—“—	111	Кешский	—“—
91	Битиктебейский	—“—	111а	Южнокепшинский	—“—
92	Загеданский	—“—	111б	Восточновысокинский	—“—
92а	Северогорячевский	—“—	112/77б	Западноахцуйская	флексура
93	Верхнелабинский	—“—	116/151г	Дзыхринский	надвиг
94	Дамхурцский	—“—	116а	Верхнедзыхринский	надвиг
95а	Чугушский	—“—	117/160	Ачмардаринский	сброс
95б	Западноуруштеньский	—“—	120	Безенгийский	сдвиг
95в	Востоочноассаринский	—“—	141/141б	Монастырско-высокинский	надвиг
95г	Западноаишховский	—“—	* второй номер, после / — номер разрыва в соседнем сегменте		
96	Западноабагский	—“—			
97	Западночугушский	—“—			
98	Востоочнобзыкский	—“—			

консолидированностью деформируемых горных пород. Данное обстоятельство сказывается на сходстве структур Срединной зоны и зоны Северного ступенчатого склона (Лабино-Малкинской), с одной стороны, и на отличии их от структур зоны Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетской), с другой. Дело в том, что на значительной части Срединной и Лабино-Малкинской зон деформациям подвергаются более “жесткие”, в разной степени метаморфизованные образования доюрского фундамента, а на остальной их части этот фундамент перекрыт маломощными мезозойскими отложениями, которые деформируются конформно с фундаментом. В пределах Южного ступенчатого склона развиты не только пластичные мощные терригенные толщи, но и вместе с ними вулканогенные и карбонатные образования мезозоя и палеогена. Поэтому и здесь общий блоковый характер орогенических деформаций проявился достаточно отчетливо. Но ориентировка новейших структур в Абхазо-Сванетской зоне более разнообразная, конфигурация их прихотливее, а дифференцированность выше.

Историко-геологическая роль фундамента в пределах рассматриваемых зон различна, на что указывал Е.Е. Милановский [10]. Северный ступенчатый склон сформирован на пологонаклонном к северу Лабино-Малкинском (Северо-Кавказском) краевом массиве, вовлеченном в новейшее сводовое воздымание. Это воздымание Е.Е. Милановский считал в основном миоплиоценовым. Срединная же зона отвечает в древней структуре горстантиклинорию Центрального Кавказа, т.е. является поднятием, унаследованным с позднегеосинклинальной стадии геологического развития.

ПШЕХСКО-АДЛЕРСКАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ШОВНАЯ ЗОНА

Эта поперечная структура на западном краю Центрального Кавказа, выделенная в конце 1950-х гг. В.Е. Хаиным и М.Г. Ломизе [24, 25], неоднократно упоминается в геологической литературе. Согласно традиционной трактовке данная структура представляет собой широкую полосу глубинных нарушений, выраженную на поверхности Цицинским и Курджипским небольшими новейшими поперечными разрывами. Зона имеет древнее заложение, так как уже с юрского времени (с келловей) влияла на фациальный состав и мощности образований мезозоя. В оксфордское время на восточном поднятом крыле Цицинского древнего поперечного разлома формируется ряд крупных рифовых тел, а на западном (опущенном) — пласты брекчий.

Для фиксации новейших движений обычно использовались деформации поверхности Лагонакского плато, которые считались позднемио-

ценовыми или плиоценовыми [24]. Предпочтение отдавалось первому варианту датировки [10, 25]. Однако допущение об одновозрастности и древности рельефа Лагонакского плато не подтверждается реальным строением речных долин. Здесь также, как и за пределами плато, прослеживаются разновозрастные элементы рельефа [11].

Детальное неоструктурное районирование показало, что новейшая Пшехско-Адлерская шовная зона характеризуется интенсивным неотектоническим дроблением, с преобладанием поперечных и диагональных разрывных дислокаций (рис. 2).

У северного края мегасвода выделяется *Северная группа блоков* (см. табл. 1) с преобладанием продольных структур. Эта группа блоков включает северный краевой ряд структурных ступеней (Хокодзинская (1а), Баранчиковская (1б) и Каменноостская (1в)) и южный ряд, объединяющий Гуамский горст (3), Сапунскую горст-ступень (2а), Западнодаховскую седловину (2б) и Восточнодаховский горст (4). Северная группа блоков — самая широкая часть Пшехско-Адлерской зоны. В то же время она отличается от основного ствола данной зоны, сближаясь по набору локальных структур и их ориентировке с дислокациями Лабино-Малкинской зоны.

На большей части зоны, расположенной южнее, наблюдается однотипная смена субмеридиональных структур. С запада зоны располагается четко орографически выраженный в виде крупного сбросового уступа (борта) край зоны максимальной густоты поперечных дислокаций, представленный *разрывным*, преимущественно *сбросовым уступом* высотой в несколько сотен метров. В расположенную восточнее область интенсивного поперечного дробления мегасвода входят два пояса блоков: *фронтальных горстов и тыловых грабен*. Между ними местами выделяется *прерывистая полоса промежуточных структурных ступеней*.

В сбросовом уступе на некоторых участках, например, в районе гор Фишт и Пшехасу, можно предположить новейшие смещения с амплитудой почти до 1 км. Он включает (см. табл. 2): Северо-гуамский (3/12б), Западнолаганакский (15/38а), Фиштский (59/36), Североамукский (69/77а), Кепшинский (77/77), Ачмардаринский (117/160) сбросы и далее на юге, в пределах Абхазии — Ачмардаринскую флексуру.

Гряда западных фронтальных горстов неравномерна по высоте. Наиболее приподнята ее *северная часть*, которая обычно относится к Лагонакскому плато (массиву или нагорью) и включает (см. табл. 1): Матазыкскую горст-ступень (5а), Лагонакский горст (5б) и треугольной формы мелко дробленное поднятие, разделенное широтным Верхнецицинским грабеном (5д). К северу от этого грабена находится квадратный Нагой-

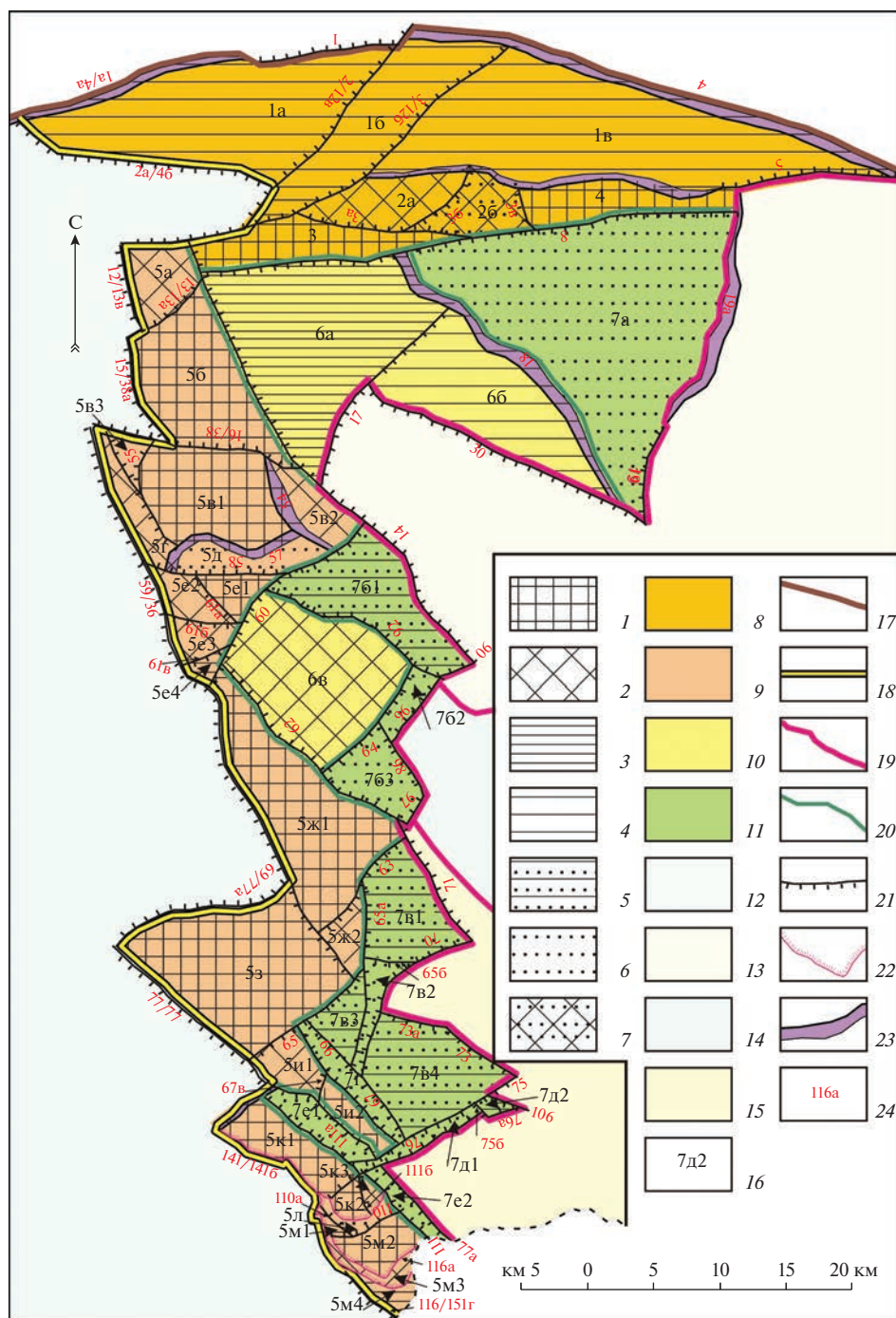


Рис. 2. Схема неоструктурного районирования Пшехско-Адлерской зоны. 1–7 – типы блоковых структур: 1 – горсты, 2 – горст-ступени, 3 – высокие ступени, 4 – ступени, 5 – грабен-ступени, 6 – грабены, 7 – седловины; 8–15 – группы блоков: 8 – Северная, 9 – гряда западных фронтальных горстов, 10 – Мезмай-Дудугушская группа ступеней, 11 – группа тыловых грабенов, 12 – Западного сегмента, 13 – зоны Северного ступенчатого склона (Лабино-Малкинской), 14 – Пшекиш-Тырныузской цепи шовных грабенов, 15 – зоны Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетской); 16 – номера блоковых структур (см. табл. 1); 17–20 – границы: 17 – Мегасвода Большого Кавказа, 18 – сегментов мегасвода, 19 – зон, 20 – подзон; 21–22 – разрывные структуры: 21 – сбросы, 22 – надвиги; 23 – флексуры; 24 – номера разрывных структур (см. табл. 2).

чукский горст (5в-1), обрамленный с востока Каменноморской горст-ступенью (5в-2), а с запада – грабен-ступенью Холодного родника (5в-3) и краевой Мессоуской горст-ступенью (5г). К югу

от упомянутого грабена находится треугольной формы горстообразное поднятие (5е), объединяющее структуры с наиболее известными вершинами: Оштенский горст (5е-1), Пшехасуйскую

(5е-2) и Фиштскую горст-ступени (5е-3), а также Южнофиштскую высокую ступень (5е-4). Этими структурами суживается и как бы выклинивается к югу северная часть гряды фронтальных горстов.

Расположенные южнее фронтальные блоки орографически существенно ниже. В них намечаются две разнотипные части. *Центральная часть* гряды фронтальных горстов представлена крупными Кутским (5ж-1) и Амуksким (5з) горстами и примыкающей к их сочленению Игошской горст-ступенью (5ж-2). *Южная часть* гряды горстов, к которой примыкает с запада Воронцовская шовно-блоковая зона, складывается мелкими горстовыми поднятиями, которые разделены продольными и поперечными грабенами. Никаноровская горст-ступень (5и-1) и Сапунский горст (5и-2) образуют локальную гряду, которая отделена Кепшинским грабеном (7е-1) от Ахцуйского горста (5к-1). Последний надстраивается с юга Высоким горстом (5к-2) и Восточновысокинской горст-ступенью (5к-3). Эти структуры отделены широтным Глубокоярским грабеном (5л) от расположенных южнее Западноглубокоярской ступени (5м-1), Дзыхринского горста (5м-2), Южнодзыхринской горст-ступени (5м-3) и Цхинской высокой ступени (5м-4).

Прерывистая полоса промежуточных структурных ступеней представлена на севере Мезмайской высокой ступенью (6а) и Дудугушской ступенью (6б), а южнее — Бзыкской грабен-ступенью (6в).

Группа тыловых грабенов включает (см. табл. 1): на севере Новопрохладненский грабен (7а); в средней части зоны — Скаженную грабен-ступень (7б-1), Восточнобзыкский грабен (7б-2) и Устьберезовый грабен (7б-3); *а на юге* — Североачишхинскую грабен-ступень (7в-1), Верхнечвижепсинский грабен (7в-2), Портартурскую (7в-3) и Медовеевскую грабен-ступени (7в-4), Чвижепсинский (7г), Устьчвижепсинский (7д-1) и Кешский (7е-2) грабены, Галионовую грабен-ступень (7д-2).

Набор и расположение главных структур, формирующих Пшехско-Адлерскую зону (краевой сбросовый уступ, пояса фронтальных поднятий и тыловых грабенов), позволил высказать предположение о ее природе [13]. Она в целом представляет собой крупный блок гравитационного отседания, т.е. первоначально единую перекошенную структурно-орографическую ступень на западном фазе поднятия Центрального сегмента. У подобных блоков, напоминающих гигантские блоковые оползни, фронтальный борт оказывается аномально приподнятым, а несколько опущенным — тыловой.

Конечно, столь крупные блоки при перекосе не могли остаться монолитными и расчленились на более мелкие структуры. Практически всю основную часть Пшехско-Адлерской поперечной региональной структуры можно представить в

виде Лагонакской, Фиштской, Кутской и Амуksкой перекошенных локальных структурно-орографических ступеней [13]. У каждой из них приподняты западные фланги и опущен восточный фланг.

Крупный разрывный уступ на западном торце Центрального сегмента мегасвода Большого Кавказа осложнен передовой системой опущенных, как бы “отсевших” к западу блоков на восточном краю Западного сегмента. К этой системе относятся Черниговский, Серебрянский, Тубский и Шумикский грабены, Северосеребрянская ступень [13].

Описанный выше набор поперечных структур, включающий передовой прогиб, фронтальный горст и тыловой грабен, возможен, скорее всего, в условиях продольного растяжения ундулирующего шарнира мегасвода. Предлагаемая трактовка позволяет также объяснить естественность крупного перегиба в рельефе Главного Кавказского хребта, давно фиксируемого многими исследователями [10, 26 и др.], который по своему положению и стилю наследует мезозойский. Следовательно, он имеет более древнее заложение, чем любые, даже самые крупные новейшие продольные структуры. Этим предопределяется и тот факт, что подобные продольные новейшие структуры не прослеживаются через данную поперечную зону.

Указанный структурный перегиб и западный фронт Центрального сегмента совпадают в основном на севере мегасвода с Цицинской поперечной зоной, трассировавшейся В.Е. Хаиным и М.Г. Ломизе [25]. Однако западный борт новейшей Пшехско-Адлерской зоны диагонален по отношению к выделявшимся В.Е. Хаиным и М.Г. Ломизе Цицинской и Курджипской зонам крупных поперечных разломов, совпадая на севере с первой из них, а на юге — со второй.

Соотношение новейших структур Пшехско-Адлерской поперечной зоны со структурами геосинклинального этапа позволило наметить отдельные унаследованные элементы, в основном разрывные (Западнолаганакский, Фиштский и другие сбросы). В районе Лагонакского плато наблюдается некоторый разворот к северу геосинклинальных структур. Именно здесь В.Е. Хаин и М.Г. Ломизе [25] проводили параллельную новейшему западному борту зоны полосу юрских рифов. Но южнее геосинклинальные структуры имеют преимущественно “кавказскую” ориентировку и диагональны по отношению к зоне в целом. Однако ряд локальных новейших структур, относящихся к тыловым структурно-орографическим ступеням, ориентирован сходно с геосинклинальными структурами. Таким образом, наиболее четко унаследованными являются северные меридианальные элементы Пшехско-Адлерской поперечной зоны. На юге наследуются только отдельные локальные структуры.

Итак, Пшехско-Адлерская поперечная зона обладает чертами длительной унаследованности развития (особенно на севере). Она формировалась на орогеническом этапе как осложнение крупного флексурообразного перегиба (ундуляции шарнира) мегасвода, с которым была связана зона поперечного растяжения. В этой зоне возникла группа перекашивавшихся в процессе отседания структурных ступеней, западные фланги которых “задирались”. В результате на этих флангах образовались высокие поднятия (горсты), а их западный край стал отчетливо выраженным в рельефе уступом. Древность заложения и унаследованность развития поперечной зоны не позволили соединиться продольным структурам Западного и Центрального сегментов мегасвода.

Следовательно, Пшехско-Адлерская зона — это региональная поперечная структура древнего заложения, длительного унаследованного развития и, судя по ее орографической выраженности, активного новообразования. Выклинивание в ее пределах продольных шовно-депресссионных зон, также характеризующихся древним заложением, например, Пшекиш-Тырныаузской, свидетельствует о существовании здесь структурных узлов торцового (Т-образного) типа, которые тоже должны иметь древнее заложение [13].

ЗОНА СЕВЕРНОГО СТУПЕНЧАТОГО СКЛОНА (ЛАБИНО-МАЛКИНСКАЯ)

Обширная зона Северного ступенчатого склона (рис. 3) обрамлена с севера и востока практически не дифференцированной грядой горстов *Пастбищного хребта*, представленной единым Пастбищно-Джинальским горстом (9). Эта структура отделяется флексурами (см. табл. 2): на севере узкой Устьдзегутинской (5б) от южных элементов Ставропольского свода, а на востоке — широкой Нальчикской (11а) от Кабардинской впадины Терско-Дагестанского прогиба. Ширина Нальчикской флексуры определяется протяженностью зоны четвертичных “террасовых ножиц” по рекам Подкумок, Малка, Баксан и Чегем [21]. К изгибу горста, сочленению и периферии указанных флексур тяготеют Минераловодский район и область Пятигорских лакколлитов.

Пастбищно-Джинальский горст отделяется Кисловодским сбросом от расширяющейся к востоку *Шедокско-Кабардинской цепи впадин*. Эта цепь отделяется на западе *Ачкоховской перемычкой* от Новопрохладненского грабена (7а). К востоку от указанной перемычки располагаются относительно узкая Шедокская ступень (10а), Тенгин-Дзегутинский грабен (10б) и разделенные флексурами широкие Кабардинская грабен-ступень (10в) и Нижнечегемская структурная ступень (10г).

Относительно узкая *гряда горстов Скалистого хребта* включает Андрюкскую горст-ступень (11а), Джангурский горст (11б) и горст Скалистого хребта (11в). Е.Е. Милановский [10, с. 145] полагал, что уровни водоразделов куэсты Скалистого хребта близки к уровню “исходной” верхнемиоценовой денудационной поверхности.

Упомянутые выше три крупные северные структурные элемента пересекают всю Лабино-Малкинскую зону.

Псебай-Бечасынская цепь грабен доходит на востоке до края восточной части Пшекиш-Тырныаузской шовной зоны и включает расширяющийся к востоку Псебай-Карачаевский грабен (12а) и Бечасынскую грабен-ступень (12б) треугольной формы. По Е.Е. Милановскому [10, с. 146], Бечасынская денудационная поверхность является средне-верхнеплиоценовой (по современным схемам — верхнеплиоценово-раннеэоплейстоценовой), восточнее, в долинах Малки и Баксана, датированной приуроченными к ней останцами липаритовых лав. Данная поверхность, по его мнению, врезана в верхнемиоценовый уровень на 0.5–0.8 км.

Расположенные южнее основные подразделения Лабино-Малкинской зоны отличаются гораздо большей дифференцированностью и локализованностью. Так, *Тхачская гряда горстов* находится у западного края рассматриваемой зоны, примыкая с востока к Новопрохладненскому грабену (7а) и обрамляясь с юга Хамышкинско-Бекесской цепью грабен. Сама Тхачская гряда горстов включает семь небольших и различно ориентированных блоков. На ее западе узкий Большетхачский горст (13в) обрамляется с запада Корытинской горст-ступенью (13а) и Бульварной ступенью (13б), а с востока — Бабульской ступенью (13г). С юго-востока к этим блокам причленяется относительно протяженный Сундукинский горст (13д), к северу от которого расположены меридианальная Бугунджинская грабен-ступень (13е) и широтные Никитинская высокая (13з) и Полковая ступени (13ж).

Дугообразно изогнутая *Хамышкинско-Бекесская цепь грабен* на западе глубоко внедряется в Пшехско-Адлерскую зону, достигая Мезмайской высокой ступени (6а). Она объединяет ряд продольных и поперечных грабен. На западе она начинается продольными Хамышкинским (14а) и Кешским (14б) грабенами и Северобамбакской перемычкой (14в), затем следуют поперечные Уруштенский (14г) и Устьуруштенский (14д) грабены, и заканчивается данная цепь субширотным продольным Бекесским грабеном (14е).

Восточнее расположен *Бахмутско-Ацгарский ступенчатый склон*, включающий три последовательно снижающихся ступени: Ацгарскую (15в), Рожжаосскую (15б) и Бахмутскую (15а).

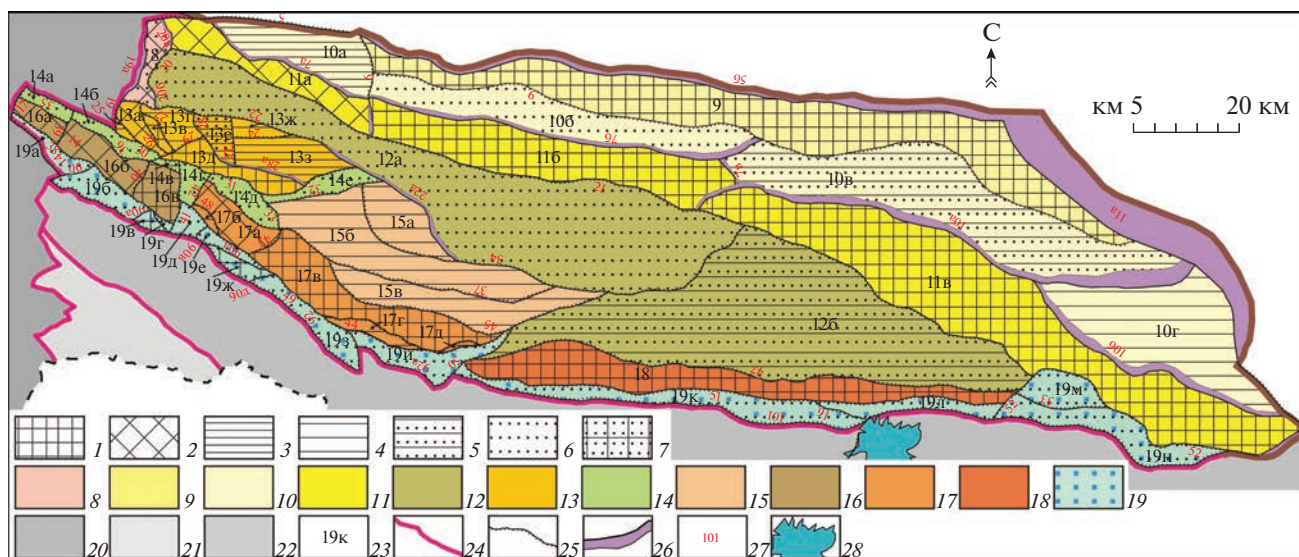


Рис. 3. Схема неоструктурного районирования Лабино-Малкинской зоны. 1–7 – типы блоковых структур: 1 – горсты, 2 – горст-ступени, 3 – высокие ступени, 4 – ступени, 5 – грабен-ступени, 6 – грабены, 7 – перемычки; 8–22 – группы блоков: 8 – Ачигоховской перемычки, 9 – гряды горстов Пастбищного хребта, 10 – Шедокско-Кабардинской цепи впадин, 11 – гряды горстов Скалистого хребта, 12 – Псебай-Бечасынской цепи грабенов, 13 – Тхачской гряды горстов, 14 – Хамышкинско-Бекесской цепи грабенов, 15 – Бахмутско-Ацгарского ступенчатого склона; 16 – Инженерно-Бамбакской гряды горстов, 17 – Балкано-Абиширской гряды горстов, 18 – Эльбашинской гряды горстов, 19 – Пшекиш-Тырныаузской цепи шовных грабенов, 20 – Пшехско-Адлерской зоны, 21 – зоны Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетской), 22 – Серединной зоны высокоподнятых горстов; 23 – номера блоковых структур (см. табл. 1); 24 – границы зон; 25 – сбросы; 26 – флексуры; 27 – номера разрывных структур (см. табл. 2); 28 – вулкан Эльбрус.

Рядом с западной частью Хамышкинско-Бекесской цепи впадин в Пшехско-Адлерскую зону внедряется **Инженерно-Бамбакская гряда горстов**, включающая Инженерную (16а) и Пшекишскую (16б) горст-ступени и Бамбакский горст (16в). Далее к востоку, отделяясь Уруштенским поперечным грабеном (14г), данная гряда горстов надстраивается более сложно построенной **Балкано-Абиширской грядой горстов**. Она начинается Балканской горст-ступенью (17а) и Мастаканской ступенью (17б) и продолжается протяженным Абиширским горстом (17в), к которому с юга примыкают Верхнеархызская (17г) и Старожилышная (17д) ступени.

Восточнее за поперечным отрогом Архызского грабена (19з) вдоль северного борта восточной части **Пшекиш-Тырныаузской** шовно-депресссионной зоны протягивается узкая **Эльбашинская гряда** (18), представленная единым горстом.

Все сказанное позволяет фиксировать последовательное усложнение строения Лабино-Малкинской зоны к западу и югу, в сторону поперечной (Пшехско-Адлерской) и продольной (Пшекиш-Тырныаузской) шовных зон.

ПШЕКИШ-ТЫРНЫАУЗСКАЯ ШОВНО-ДЕПРЕССИОННАЯ ЗОНА

Длительно унаследованная разобшенность Лабино-Малкинской и Серединной структурных

зон подчеркивается древностью разделяющей их Пшекиш-Тырныаузской шовно-депресссионной зоны, которая, по мнению ряда исследователей, заложила еще в раннем палеозое [1]. Е.Е. Милановский [10, с. 15] полагал, что эта зона на протяжении большей части альпийского этапа служила северной границей (краевым швом) геосинклинальной области и продолжает развиваться до настоящего времени. Наиболее характерными новейшими элементами этих зон служат протяженные продольные грабены, а местами и смежные с ними горсты [11].

Молодая активность Пшекиш-Тырныаузской зоны подчеркивается проявлениями магматизма. Например, в долине р. Баксан у г. Тырныауз располагается интрузия эльджуртинских биотитовых гранитов и прорывающих ее трех штоков риолитов. Абсолютный возраст эльджуртинских гранитов колеблется от 1.90 ± 0.15 до 1.80 ± 0.15 млн лет, а прорывающих их штоков риолитов и различных кислых даек – от 1.89 ± 0.15 до 1.20 ± 0.20 млн лет [2; 7, с. 260].

В новейшем структурном плане Пшекиш-Тырныаузская шовно-депресссионная зона представлена узкой и весьма протяженной (300 км) цепью грабенов (рис. 4, 5). В ее строении выделяется две разнородные части, с границей на меридиане Архыза.

Западная часть запад-северо-западного простирания характеризуется серией относительно

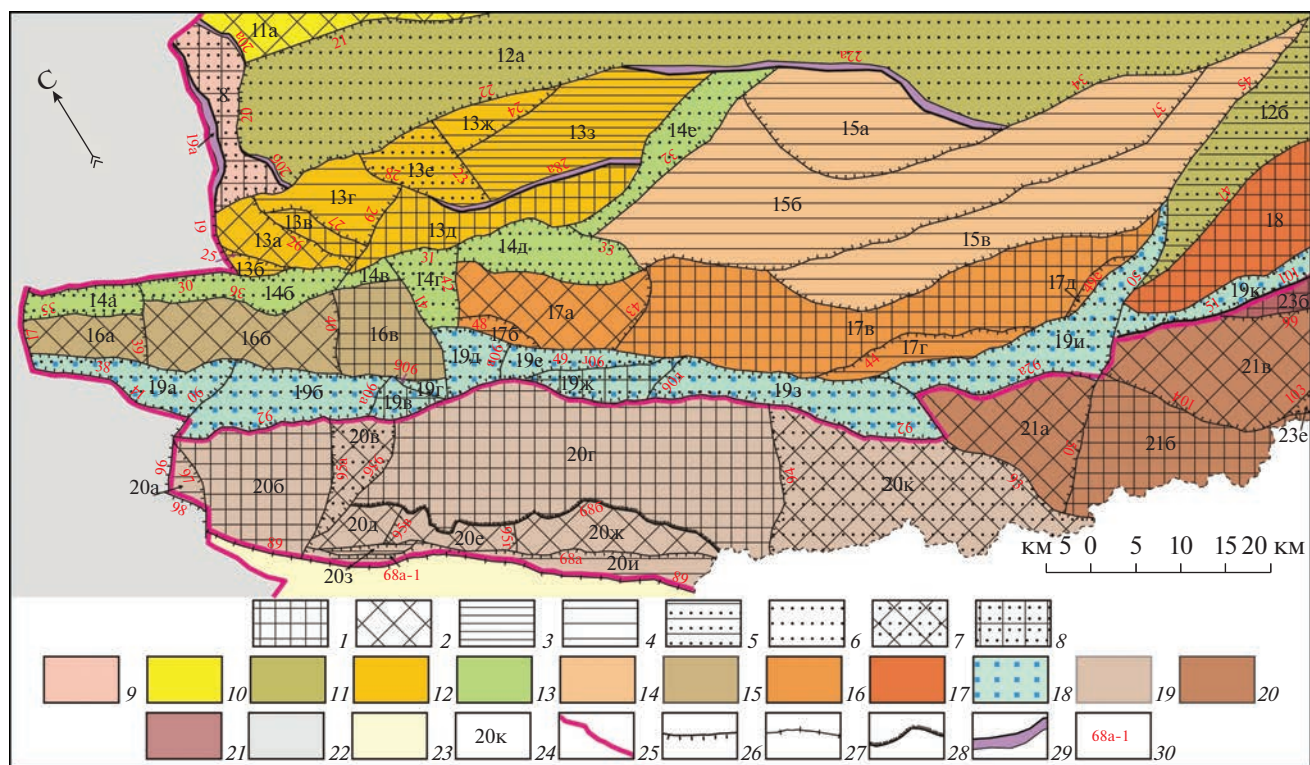


Рис. 4. Схема неоструктурного районирования Пшекиш-Тырныаузской шовно-депресссионной зоны (западный фрагмент) и смежных структур. 1–8 – типы блоковых структур: 1 – горсты, 2 – горст-ступени, 3 – высокие ступени, 4 – ступени, 5 – грабен-ступени, 6 – грабены, 7 – седловины, 8 – перемычки; 9–23 – группы блоков: 9 – Ачигоховской перемычки, 10 – гряды горстов Скалистого хребта, 11 – Псебай-Бечасынской цепи грабенов, 12 – Тхачской гряды горстов, 13 – Хамышкинско-Бекесской цепи грабенов, 14 – Бахмутско-Ацгарского ступенчатого склона, 15 – Инженерно-Бамбакской гряды горстов, 16 – Балкано-Абиширской гряды горстов, 17 – Эльбашинской гряды горстов, 18 – Пшекиш-Тырныаузской цепи шовных грабенов, 19 – Чутушской гряды горстов, 20 – Софийско-Эрцогской гряды горстов, 21 – Эльбрусской клавишной системы блоков, 22 – Пшехско-Адлерской зоны, 23 – зоны Южного ступенчатого склона (Абхазо-Сванетской); 24 – номера блоковых структур (см. табл. 1); 25 – границы зон; 26 – сбросы; 27 – сбросо-взбросы; 28 – надвиги; 29 – флексуры; 30 – номера разрывных структур (см. табл. 2).

коротких блоковых элементов. В ней с запада на восток сменяются Гузерипльский (19а) и Козлиный грабены (19б), Аспидная перемычка (19в), Аспидный (19г), Алоусский (19д), Ачипстинский (19е) грабены, Умпырская перемычка (19ж), Загеданский (19з) и Архызский (19и) грабены. Северо-восточная часть последнего является ответвлением к северу от общего простирания цепи грабенов.

Восточная часть данной зоны в основном широтна и представлена весьма протяженными (шелевидными) Тебердинским (19к) и Шаукольским (19л) грабенами, которые с севера сопровождаются узким Эльбашинским горстом (18). Восточнее происходит локальное расширение зоны за счет Северотырныаузского грабена (19м) и изгиб зоны в расположенном южнее осевом Тырныаузском грабене (19н). Этот изгиб характерен для новейшего структурного плана и связан, очевидно, со сдвиговыми неотектоническими деформациями на сочленении Центрального и Казбекского сегментов мегасвода.

На западе в выделяемой им Архыз-Уруштенской грабен-синклинали Е.Е. Милановский [10] допускал относительные опускания, обусловившие мощную аккумуляцию четвертичных осадков в долинах р. Большая Лаба у с. Загедан и р. Большой Зеленчук у с. Архыз (Загедано-Архызская грабенообразная депрессия, по Н.И. Кочетову [8]).

Для новейшего этапа Е.Е. Милановский указывал в Пшекиш-Тырныаузской шовной зоне молодые (главным образом плиоценовые, но местами и четвертичные) подвижки по крутым разломам с амплитудой в несколько сотен метров, как правило, с относительно приподнятыми южными крыльями. По Е.А. Долгинову [6], крупные разрывы, обрамляющие эти структуры, представлены либо сбросами, либо “kozyрьковыми” надвигами. При этом цепь новейших грабенов не полностью совпадает с полосой так называемых “юрских депрессий”. Грабены, выполненные юрскими отложениями, в отличие от новейших, не образуют непрерывной цепи и во многих местах либо несколько смещены к северу или югу, либо

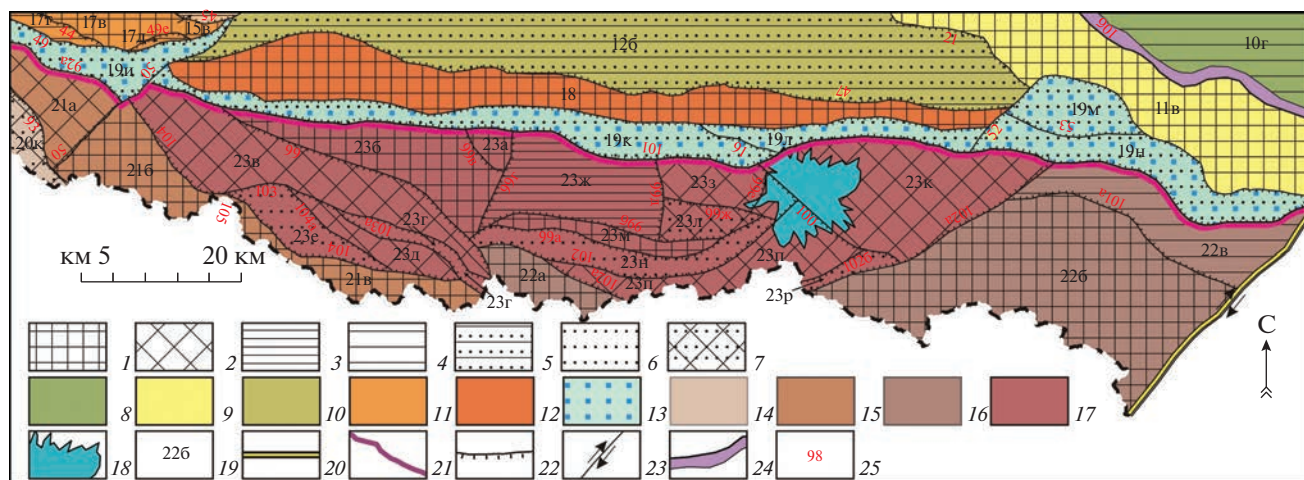


Рис. 5. Схема неоструктурного районирования Пшекиш-Тырныаузской шовно-депрессивной зоны (восточный фрагмент) и смежных структур. 1–7 – типы блоковых структур: 1 – горсты, 2 – горст-ступени, 3 – высокие ступени, 4 – ступени, 5 – грабен-ступени, 6 – грабены, 7 – седловины; 8–17 – группы блоков: 8 – Шедокско-Кабардинской цепи впадин, 9 – гряды горстов Скалистого хребта, 10 – Псебай-Бечасынской цепи грабенов, 11 – Балкано-Абиширской гряды горстов, 12 – Эльбашинской гряды горстов, 13 – Пшекиш-Тырныаузской цепи шовных грабенов, 14 – Чугушской гряды горстов, 15 – Софийско-Эрцогской гряды горстов, 16 – Нахарско-Верхнечегемской гряды горстов, 17 – Эльбрусской клавишной системы блоков; 18 – ледники вулкана Эльбрус; 19 – номера блоковых структур (см. табл. 1); 20–21 – границы: 20 – сегментов, 21 – зон; 22 – сбросы; 23 – сдвиг; 24 – флексуры; 25 – номера разрывных структур (см. табл. 2).

отличаются по ширине (например, в районе с. Архыз). Очевидно, формирование таких грабенов, их сложных складчатых деформаций и кливажа, а также большие (до 1–1.5 км) перемещения по разрывам относятся к геосинклинальному этапу геологического развития.

Это свидетельствует о существенной новейшей перестройке данной шовной структуры. В то же время существование разновозрастных близко совпадающих цепей шовных грабенов указывает на высокую степень унаследованности новейших структур Пшекиш-Тырныаузской шовной зоны.

СРЕДИННАЯ ЗОНА ВЫСОКОПОДНЯТЫХ ГОРСТОВ

Зона осевых поднятий в Центральном сегменте мегасвода делится на четыре части с определенными особенностями строения (см. рис. 4, 5).

Западная **Чугушская гряда горстов** представлена достаточно монолитной осевой грядой, образованной Псеашхинским горстом (20г), который с запада отделен Верхнекишской седловиной (20в) от передового Чугушского горста (20б), сопровождаемого фронтальной Абагской ступенью (20а). Южный край Псеашхинского горста обрамлен целой серией прибортовых блоков, включающей Ассаринскую (20д), Южнопсеашхинскую (20е), Аишхинскую (20ж) грабен-ступени, Южноассаринскую высокую ступень (20з) и Южноаишхинскую ступень (20и). На востоке Псеашхинский горст надстраивается обширной Санчаринской седловиной (20к), которой он отделяет-

ся от **Софийско-Эрцогской гряды горстов**. Эта гряда включает три крупных элемента: Аксаринскую горст-ступень (21а), Софийский (21б) и Эрцогский (21в) горсты. Данная гряда в свою очередь надстраивается **Нахарско-Верхнечегемской грядой горстов**, которая объединяет Нахарский (22а) и Верхнечегемский (22б) горсты и Эльтубюнскую ступень (22в).

К северу от двух последних осевых гряд горстов располагается обширная **Эльбрусская клавишная система блоков**, построенная в целом веерообразно. Западную часть данного веера образуют: Алибек-Домбайский (23е) и Клухорский грабены (23г), Мусатчерийская (23д) и Бадукская (23в) горст-ступени, Хатигорский (23б) и Кышкаджерский (23а) горсты. В восточную часть веера входят: Северокуршинская высокая ступень (23ж), Куршуская (23з), Западноэльбрусская (23и) и Нижнечириккольская (23л) горст-ступени, Куршинский горст (23м), Даут-Верхнекубанский (23н) и Далар-Верхнебаксанский (23р) грабены и Азауская (23п) горст-ступень. С востока ко всей этой части веера примыкает обширная Эльбрусская горст-ступень (23к) треугольной формы. Вулкан Эльбрус находится на сочленении западного угла этой горст-ступени с Западноэльбрусской (23и) и Азауской (23п) горст-ступенями.

Южным ограничением срединной зоны обычно считают систему разрывов, объединяемых в так называемую зону Главного Кавказского надвига или Главного Кавказского разлома. Здесь предполагались пологие сместители, по ним палеозойский фундамент надвинут на юрские отло-

жения. Однако в последние годы эта структура альпийского этапа рассматривается как “срыв взбросового типа” на опрокинутом к югу контакте фундамента и чехла с плоскостью, наклоненной к северу под углом $65\text{--}70^\circ$ и только в локальных “kozyрьковых” структурах — под углами до 40° [22, с. 133]. Под углами 65° или круче этот разлом прослеживается по геофизическим данным на Центральном Кавказе до глубины 80 км [28, 29]. Е.Е. Милановский [10] сомневался, что в этой зоне имели место в плиоцене — антропогене большие подвижки, так как в некоторых местах она “залечена” интрузиями позднего мела (?) или палеогена (неоинтрузии Кабари, Цурунгал). Но с фронтом Главного надвига совпадает очень резкий геоморфологический уступ, который нельзя объяснить только различиями в денудационной стойкости гранитов и юрских сланцев. Поэтому Е.Е. Милановский предполагал, что зона Главного надвига выражена в новейшей структуре флексурной ступенной, наложенной на древнюю складчато-надвиговую структуру. Однако современные геоморфологические материалы позволили проследить здесь новейшую Мзымтинскую шовно-депресссионную зону, северным бортом которой служит Главный Кавказский разлом [13].

Можно согласиться с Е.Е. Милановским [10], считавшим завышенными оценки разрывных смещений в зоне Главного надвига в 1–1.5 км с конца плиоцена (по А.Л. Цагарели [27]) и 0.1–0.2 км с позднеледникового времени (по В.А. Растворовой и Е.А. Щербаковой [20]). Вероятно, в данных оценках за новейшие принимаются и мезозойские смещения.

МЗЫМТИНСКАЯ ШОВНО-ДЕПРЕССИОННАЯ ЗОНА

Мзымтинская цепь шовных грабенов, ограниченная региональными разрывами (сбросами и взбросами) с амплитудой новейших смещений до первых сотен метров, служит границей Срединной зоны и зоны Южного ступенчатого склона (рис. 6) [13].

В пределы России попадает только западная часть шовной зоны, представленная расширяющейся к западу и расщепляющейся системой грабенов. Северная ветвь образована Ачипсинским грабеном (24а), который надстраивается к юго-востоку Нижнелаурской (24б), Псекоховской (24в) и Нижнеплухской (24г) грабен-ступенями, а далее — Долгинским (24е) и Бзычским (24ж) осевыми грабенами. Южную ветвь образует западная часть Эстосадокского грабена (24д).

Здесь и восточнее Мзымтинская шовно-депресссионная зона обладает южным разрывно-грабеновым оперением, но практически лишена северного оперения [13].

Важно отметить, что новейшая Мзымтинская шовная зона отличается от зоны Главного Кавказского разлома тектодинамической обстановкой формирования. Если зона Главного разлома, по крайней мере, в позднегеосинклинальную стадию развивалась в условиях горизонтального сжатия, то Мзымтинская шовная зона представляет собой результат заклинивания проседающих шовных блоков в условиях растяжения, которые обычны на исходных флексурных перегибах при сводовых воздыманиях. Следовательно, Мзымтинская шовная зона отличается от Пшекиш-Тырныауской меньшей степенью унаследованности, хотя и сходна по времени (палеозой, по Г.Д. Аджигирею [1]) заложения.

Таким образом, главные продольные новейшие структурные зоны основной части Центрального сегмента мегасвода Большого Кавказа разграничены между собой крупными шовно-депресссионными зонами, которые выклиниваются при приближении к Пшехско-Адлерской поперечной зоне. Эти зоны отличаются древним заложением, но разной степенью унаследованности структурных форм.

ЗОНА ЮЖНОГО СТУПЕНЧАТОГО СКЛОНА (АБХАЗО-СВАНЕТСКАЯ)

Расположенная в пределах российской территории часть Абхазо-Сванетской зоны (см. рис. 6) включает находящиеся к югу от Мзымтинской шовно-депресссионной зоны три основных подразделения: Ачишхинскую группу блоков, Аибгинскую гряду горстов и Пихтовую группу блоков. Первые две располагаются вдоль южного борта Мзымтинской шовной зоны, а Пихтовая, отличающаяся северо-восточным простиранием, торцово причленяется с юга к Аибгинской гряде. Такое разнобразие простираний свойственно и всей расположенной восточнее большей части Абхазо-Сванетской зоны [13].

Ачишхинская группа блоков имеет в целом прямоугольную форму. На ее северо-западе находится Ачишхинский горст (25а), к которому с юга примыкает Южноачишхинская ступень (25в). Хмелевский горст (25б) отделен Бешенским грабеном (25д) от Западнобешенской горст-ступени (25г) и обрамляется Южнохмелевской ступенью (25е).

Аибгинская гряда горстов представлена горной грядой, сопровождающей с юга Мзымтинскую шовную зону. В этой гряде осевые поднятия: Аибгинский (26а) и Агепстский (26е) горсты и Западноагепстская горст-ступень (26д), обрамлены с севера Верхнержаной (26б) и Североаибгинской (26в) ступнями, а с юга — Южноаибгинской ступенью (26г).

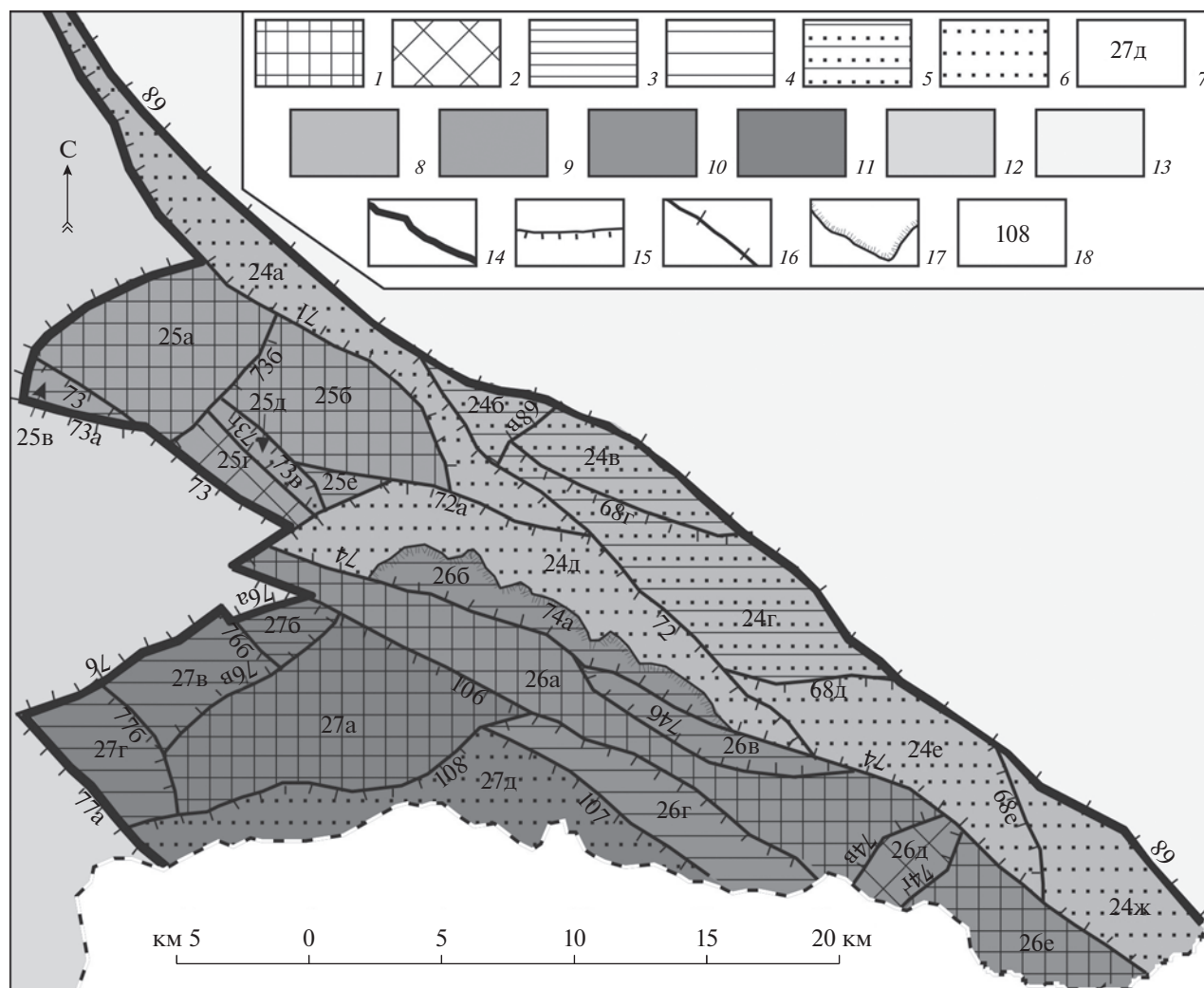


Рис. 6. Схема неоструктурного районирования Мзымтинской шовно-депресссионной зоны. 1–6 – типы блоковых структур: 1 – горсты, 2 – горст-ступени, 3 – высокие ступени, 4 – ступени, 5 – грабен-ступени, 6 – грабены; 7 – номера блоковых структур (см. табл. 1); 8–13 – группы блоков: 8 – Мзымтинской цепи шовных грабенов, 9 – Ачишхинской группы блоков, 10 – Аибгинской гряды горстов, 11 – Пихтовой группы блоков, 12 – Пшехско-Адлерской зоны, 13 – Серединной зоны высокоподнятых горстов; 14 – границы зон; 15 – сбросы; 16 – сбросо-взбросы; 17 – надвиги; 18 – номера разрывных структур (см. табл. 2).

Пихтовая группа блоков восток-северо-восточного простираения представлена Пихтовым горстом (27а), который обрамлен с запада Верхнеарквинской ступенью (27г), а с северо-запада – Североподковной ступенью (27в) и Верхнегалионовой высокой ступенью (27б). На юге Пихтовый горст и Верхнеарквинская ступень граничат с Верхнепсоуским грабеном (27д), большая часть которого находится в Абхазии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное среднемасштабное неоструктурное районирование Центрального сегмента мега-свода Большого Кавказа показало значительную сложность строения выделявшихся ранее региональных неотектонических структур [10].

Установлены значительные различия в дифференцированности неотектонического (позднеорогенного) структурного плана разных частей сегмента: меньшая дифференцированность на его севере и востоке и большая – на юге и западе.

Показана существенная перестройка всех региональных шовных зон, имеющих древнее заложение. Такая перестройка характерна и для новейших локальных блоковых и разрывных структур, связанных с орогеническим воздыманием. Эти новейшие структуры принципиально отличаются от более древних структур, формировавшихся в иной тектодинамической обстановке с преобладанием горизонтального сжатия. Как правило, при геологической съемке здесь картируют именно доновейшие структуры. Поэтому для территории Кавказского орогена, в том числе

и для его Центрального сегмента, неотектонические карты не представлены в подавляющем большинстве опубликованных материалов по листам геологических карт масштаба 1:200000.

Выделенные локальные неотектонические структуры важны для повышения качества различных прикладных исследований, в том числе, — при проведении инженерных, гидрогеологических и геоэкологических изысканий для строительного проектирования. На территории Центрального сегмента мегасвода Большого Кавказа проводившиеся ранее детальные и крупномасштабные неотектонические исследования использовались при инженерно-геологических изысканиях для проектирования: 1) горного кластера Олимпийских объектов Красная Поляна [3, 4, 11, 13, 14, 16–18], 2) курортно-туристического комплекса Лагонаки, 3) курортного комплекса Архыз.

Неотектонические структуры находят отражение в палеоэкологических исследованиях, например, при изучении археологических памятников, особенно палеолитических стоянок [5, 11, 19, 23 и др.]. Поэтому проведенное среднемасштабное неоструктурное районирование имеет перспективы для дальнейшего использования. Такое районирование необходимо и для других сегментов новейшего мегасвода Большого Кавказа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажгирей Г.Д. Разломы глубокого заложения. Некоторые новые факты и представления // Разломы глубокого заложения: геология и полезные ископаемые. М.: РУДН, 1984. С. 3–32.
2. Борсук А.М. Мезозойские и кайнозойские магматические формации Большого Кавказа. М.: Наука, 1979. 299 с.
3. Вадачкоря О.А., Воейкова О.А., Мурый А.А., Несмеянов С.А. Тектонические условия строительства горного кластера Олимпийских объектов Большого Сочи // XLVI Тектон. сов. “Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различие, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения”. М.: ГЕОС, 2014. Т. 1. С. 32–36.
4. Вадачкоря О.А., Воейкова О.А., Мурый А.А., Несмеянов С.А. Формирование опасных геологических процессов на северном склоне хребта Аибга // Сергеевские чтения. М.: РУДН, 2014. Вып. 16. С. 235–239.
5. Грот Сарадж-Чуко в Приэльбрусье (результаты междисциплинарных исследований 2017–2019 гг.) / Редакторы: Л.В. Голованова, Е.В. Дороничева, В.Б. Дороничев. СПб.: Изд-во РИПОЛ классик, 2020. 408 с.
6. Долгинов Е.А. О характере разрывных нарушений, развитых в области древнего ядра Кавказа // Известия Вузов. Геология и разведка. 1959. № 7. С. 60–69.
7. Короновский Н.В., Демина Л.И. Позднекайнозойский магматизм Большого Кавказа // Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова М.: ГЕОС, 2007. С. 251–284.
8. Кочетов Н.И. Морфоструктурный анализ речной сети верхней и средней Кубани // Геоморфология. 1981. № 1. С. 83–91.
9. Ломизе М.Г., Хаин В.Е. Древние долины и перестройка речной сети на Западном Кавказе под влиянием новейших движений // Вестник Московского университета. Сер. 5: география. 1965. № 4. С. 17–25.
10. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 484 с.
11. Несмеянов С.А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 392 с.
12. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 780 с.
13. Несмеянов С.А. Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: Недра, 1992. 254 с.
14. Несмеянов С.А., Вадачкоря О.А., Воейкова О.А., Мурый А.А. Структурно-геоморфологическая основа крупномасштабного инженерно-геологического картирования в горных областях // Сергеевские чтения. М.: РУДН, 2015. Вып. 17. С. 62–66.
15. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. Неотектоника Воронцовской зоны и проблема молодых надвигов на Западном Кавказе // Геоэкология. 2020. № 4. С. 3–20.
16. Несмеянов С.А., Воейкова О.А., Мурый А.А. Детализация схемы активных разрывов для инженерных изысканий в горной области (на примере бассейна р. Мзымты на Кавказе) // Геоэкология. 2011. № 5. С. 450–454.
17. Несмеянов С.А., Воейкова О.А., Мурый А.А. Методика построения среднемасштабных количественных палеореконовструкций рельефа приморского орогена // Геоэкология. 2016. № 1. С. 3–24.
18. Несмеянов С.А., Воейкова О.А., Мурый А.А. Среднемасштабные количественные реконструкции палеорельефа приморского орогена (на примере бассейна р. Мзымты на Кавказе) // Геоэкология. 2016. № 4. С. 292–303.
19. Пещера Матузка / Голованова Л.В. и др. / Под ред. Л.В. Головановой и В.Б. Дороничева. СПб: Островитянин, 2006. 194 с.
20. Растворова В.А., Щербакова Е.М. Поднятие Центрального Кавказа за поздне- и послеледниковое время // Современные движения земной коры. М.: Изд-во АН СССР, 1963. № 1. С. 297–303.
21. Рейснер Г.И., Богачкин Б.М. Стратиграфия и тектоника антропогена Центрального Предкавказья. М.: ИФЗ, 1989. 196 с.
22. Сомин М.Л. Альпийская деформация комплексов основания и тектонический стиль Большого Кавказа // Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: ГЕОС, 2007. С. 111–140.
23. Треугольная пещера. Ранний палеолит Кавказа и Восточной Европы / Под ред. Л.В. Головановой и В.Б. Дороничева. СПб.: Островитянин, 2007. 270 с.
24. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. О молодых подвижках по древним разломам и их влиянии на гидрографическую сеть // Известия Вузов. Геология и разведка. 1959. № 8. С. 17–21.
25. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Поперечные конседиментационные разломы на границе Центрального и Западного Кавказа и распределение фаций мезозоя и

- кайнозой // Известия АН СССР. Сер. геологическая. 1961. № 3. С. 26–43.
26. Хаин В.Е., Муратов В.М. О поперечной ступенчатости в рельефе Северо-Западного Кавказа // Структурно-геоморфологические исследования в Прикаспии. М.: Гостоптехиздат, 1962. С. 287–297.
 27. Цагарели А.Л. Четвертичная тектоника Грузии // XXII сессия МГК. Доклады советских геологов. М.: Недра, 1964. С. 144–155.
 28. Шемпелев Г.А., Пруцкий Н.И., Фельдман И.С., Кухмазов С.У. Геолого-геофизическая модель по профилю Туапсе – Армавир // Тектоника неогена. Общие и региональные аспекты: матер. XXXIV Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2001. Т. 2. С. 316–320.
 29. Шемпелев Г.А., Пруцкий Н.И., Кухмазов С.У. и др. Материалы геофизических исследований вдоль Приэльбрусского профиля (вулкан Эльбрус – Кавказские Минеральные Воды) // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: матер. XXXVIII Тектонического совещания / Отв. ред. Ю.В. Карякин. Т. 2. С. 361–365.
 30. Nesmeyanov S., Voeikova O. Suture Zones as Upper Crustal Seismogenerating Structures // Natural Hazards and Risk Research in Russia. Springer. 2018. P. 205–219.

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

S. A. Nesmeyanov^a, O. A. Voeikova^{a, #}, and M. N. Komarevskaya^a

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

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

Detailed neostuctural zoning with typification of tectonic structures should be performed before engineering surveys on the territory of the newest orogens or their large parts. A medium-scale neostuctural zoning of the central segment of the Greater Caucasus megavault was carried out. It showed a significantly complex structure of the previously distinguished regional neotectonic bodies. The neotectonic structural plan is less differentiated in the north and east of the segment and it is more differentiated in the southern and western parts. A significant transformation of all local structures and regional suture zones is shown. It is connected with the fact that the newest structures are produced by orogenic uplift, and the older ones were formed under the conditions of horizontal compression. The results of neotectonic zoning are used in engineering, hydrogeological and geoeological surveys for construction design. They are important for paleoecological research, for example, in the study of archaeological sites.

Keywords: orogen, megavault, segment, zone, suture zone, horst, graben, step, rupture

REFERENCES

1. Azhgirei, G.D. *Razlomy glubokogo zalozheniya. Nekotorye novye fakty i predstavleniya* [Deep faults. Some new facts and idea]. *Razlomy glubokogo zalozheniya: geologiya i poleznye iskopaemye* [Deep faults: geology and mineral deposits]. Moscow, RUDN Publ., 1984, pp. 3–32. (in Russian)
2. Borsuk, A.M. *Mezozoiskie i kainozoiskie magmaticheskie formatsii Bol'shogo Kavkaza* [Mesozoic and Cenozoic igneous formations of the Greater Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 299 p. (in Russian)
3. Vadachkoriya, O.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A., Nesmeyanov, S.A. *Tektonicheskie usloviya stroitel'stva gornogo klastera Olimpiiskikh ob'ektov Bol'shogo Sochi* [Tectonic conditions of the construction of the Olympic facilities in mountainous part of Greater Sochi]. Proc. XLVI Tectonic workshop. Tectonics of fold belts in the Eurasia: similarity, differences, specific features of recent orogenesis, regional generalization. Moscow, GEOS Publ., 2014, vol. 1, pp. 32–36. (in Russian)
4. Vadachkoriya, O.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A., Nesmeyanov, S.A. *Formirovanie opasnykh geologicheskikh protsessov na severnom sklone khrebt Aibga* [Development of geohazards on the northern slope of Aibga ridge]. *Sergeevskie chteniya*. Moscow, RUDN Publ., 2014, vol. 16, pp. 235–239. (in Russian)
5. *Grot Saradzh-Chukov v Priel'brus'e (rezul'taty mezhdisiplinarnykh issledovaniy 2017–2019 gg.)* [Saradzh-Chuko grotto in the Elbrus region (results of interdisciplinary research 2017–2019)]. Doronicheva, E.V., Golovanova, L.V., Doronichev V.B. et al. St. Petersburg, RIPOI Classic Publ., 2020, 408 p. (in Russian)
6. Dolginov, E.A. *O kharaktere razryvnykh narushenii, razvitykh v oblasti drevnego yadra Kavkaza* [On the nature of discontinuities developed within the ancient Caucasus core]. *Izv.vuzov. Geologiya i razvedka*. 1959, no. 7, pp. 60–69. (in Russian)
7. Koronovskii, N.V., Demina, L.I. *Pozdnetskainozoiskii magmatizm Bol'shogo Kavkaza* [Late Cenozoic magmatism of the Greater Caucasus]. *Bol'shoi Kavkaz v al'piiskuyu epokhu* [Greater Caucasus in the Alpine tectonic epoch]. Moscow, GEOS Publ., 2007, pp. 251–284. (in Russian)
8. Kochetov, N.I. *Morfostrukturnyi analiz rechnoi seti verkhnei i srednei Kubani* [Morphostructural analysis of the river network in the upper and middle reaches of the Kuban River]. *Geomorfologiya*, 1981, no. 1, pp. 83–91. (in Russian)
9. Lomize, M.G., Khain, V.E. *Drevnie doliny i perestroika rechnoi seti na Zapadnom Kavkaze pod vliyaniem novej-*

- shikh dvizhenii* [Ancient valleys and restructuring of the river network in the Western Caucasus under the influence of the latest movements]. *Vestn. moskovskogo universiteta, ser. V: geografiya*, 1965, no. 4, pp. 17–25. (in Russian)
10. Milanovskii, E.E. *Noveishaya tektonika Kavkaza* [The newest tectonics of the Caucasus]. Moscow, Nedra Publ., 1968, 484 p. (in Russian)
 11. Nesmeyanov, S.A. *Geomorfologicheskie aspekty paleoekologii gornogo paleolita (na primere Zapadnogo Kavkaza)* [Geomorphological aspects of paleoecology of mountain Paleolithic (by the example of Western Caucasus)]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1999, 392 p. (in Russian)
 12. Nesmeyanov, S.A. *Inzhenernaya geotektonika* [Engineering geotectonics]. Moscow, Nauka Publ., 2004, 780 p. (in Russian)
 13. Nesmeyanov, S.A. *Neostrukturalnoe raionirovanie Severo-Zapadnogo Kavkaza (operezhayushchie issledovaniya dlya inzhenernykh izyskaniy)* [Neostuctural zoning of the North-Western Caucasus (advanced research for engineering survey)]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 254 p. (in Russian)
 14. Nesmeyanov, S.A., Vadachkoriya, O.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A. *Strukturalno-geomorfologicheskaya osnova krupnomasshtabnogo inzhenerno-geologicheskogo kartirovaniya v gornykh oblastyakh* [Structural-geomorphological basis of large-scale engineering-geological mapping in mountainous areas]. *Sergeevskie chteniya*. Moscow, RUDN Publ., 2015, vol. 17, pp. 62–66. (in Russian).
 15. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A. *Neotektonika Vorontsovskoi zony i problema molodykh nadvigov na Zapadnom Kavkaze* [Neotectonics of the Vorontsov zone and the problem of young thrusts in the Western Caucasus]. *Geoekologiya*, 2020, no. 4, pp. 3–20. (in Russian)
 16. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A. *Detalizatsiya skhemy aktivnykh razryvov dlya inzhenernykh izyskaniy v gornoi oblasti (na primere basseina r. Mzymty na Kavkaze)* [Detalization of active faults scheme in engineering survey in mountainous area (by the example of Mzymta River basin in the Caucasus)]. *Geoekologiya*, 2011, no 5, pp. 450–454. (in Russian)
 17. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A. *Metodika postroeniya srednemasshtabnykh kolichestvennykh paleorekonstruktsii rel'efa primorskogo orogena* [Methodology of medium-scale quantitative paleoreconstructions of the Primorsky orogen relief]. *Geoekologiya*, 2016, no. 1, pp. 3–24. (in Russian)
 18. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A. *Srednemasshtabnye kolichestvennye rekonstruktsii paleorel'efa primorskogo orogena (na primere basseina r. Mzymty na Kavkaze)* [Medium-quantitative reconstruction paleorelief seaside Orogen (for example, river basin. Mzymta the Caucasus)]. *Geoekologiya*, 2016, no. 4, pp. 292–303. (in Russian)
 19. *Peshchera Matuzka* [Matuzka Cave]. Golovanova, L.V., Doronichev, V.B., et al. St. Petersburg, Ostrovityanin Publ., 2006, 194 p. (in Russian)
 20. Rastvorova, V.A., Shcherbakova, E.M. *Podnyatie Tsentral'nogo Kavkaza za pozdne- i poslednednikovoe vremya* [Uplift of the Central Caucasus during the late and post-glacial period]. *Sovremennye dvizheniya zemnoi kory* [Modern movements of the Earth's crust]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, no. 1, pp. 297–303. (in Russian)
 21. Reisner, G.I. Bogachkin, B.M. *Stratigrafiya i tektonika antropogena Tsentral'nogo Predkavkaz'ya* [Stratigraphy and tectonics of Anthropogene in the Central CisCaucasia]. Moscow, IFZ RAN Publ., 1989, 196 p. (in Russian)
 22. Somin, M.L. *Al'piiskaya deformatsiya kompleksov osnovaniya i tektonicheskii stil' Bol'shogo Kavkaza* [Alpine deformation of the base complexes and the tectonic style of the Greater Caucasus]. *Bol'shoi Kavkaz v al'piiskuyu epokhu* [The Greater Caucasus in the Alpine era]. Moscow, GEOS Publ., 2007, pp. 111–140. (in Russian)
 23. *Treugol'naya peshchera. Rannii paleolit Kavkaza i Vostochnoi Evropy* [Triangular cave. Early Paleolithic of the Caucasus and the Eastern Europe]. Doronichev, V.B., et al. St. Petersburg, Ostrovityanin Publ., 2007, 270 p. (in Russian)
 24. Khain, V.E., Lomize, M.G. *O molodykh podvizhnykh po drevnim razlomam i ikh vliyaniy na gidrograficheskuyu set'* [About young movements along ancient faults and their influence on the hydrographic network]. *Izv.vuzov. Geologiya i razvedka*, 1959, no. 8, pp. 17–21. (in Russian)
 25. Khain, V.E., Lomize, M.G. *Poperechnye konsedimentatsionnye razlomy na granitse Tsentral'nogo i Zapadnogo Kavkaza i raspredelenie fatsii mezozoya i kainozoya* [Transverse consedimentary faults on the border of the Central and Western Caucasus and the distribution of Mesozoic and Cenozoic facies]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geologicheskaya*, no. 3, pp. 26–43. (in Russian)
 26. Khain, V.E., Muratov, V.M. *O poperechnoi stupenchatosti v rel'efe Severo-Zapadnogo Kavkaza* [About transverse stepping in the Northwestern Caucasus]. *Strukturalno-geomorfologicheskie issledovaniya v Prikaspii*. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1962, pp. 287–297. (in Russian)
 27. Tsagareli, A.L. *Chetvertichnaya tektonika Gruzii* [Quaternary tectonics of Georgia]. Proc. XXII session IGC, reports from Soviet geologists, topic 11. Moscow, Nedra Publ., 1964, pp. 144–155. (in Russian)
 28. Shempelev, G.A., Prutskii, N.I., Fel'dman, I.S., Kukhmazov, S.U. *Geologo-geofizicheskaya model' po profilu Tuapse–Armavir* [Geological and geophysical model along the Tuapse–Armavir profile]. *Tektonika neogena. Obshhie i regional'nye aspekty. (Materialy XXXIV Tektonicheskogo soveshchaniya)* [Tectonics of the Neogen. General and regional aspects. (Proc. the XXXIV Tectonic Meeting)]. Moscow, GEOS Publ., 2001, vol. 2, pp. 316–320. (in Russian)
 29. Shempelev, G.A., Prutskii, N.I., Kukhmazov, S.U. et al. *Materialy geofizicheskikh issledovaniy vdol' Priel'bruskogo profilya (vulkan El'brus – Kavkazskie Mineral'nye Vody)* [Materials of geophysical studies along the Elbrus profile (Elbrus volcano – Caucasian Mineralnye Vody)] *Tektonika zemnoi kory i mantii. Tektonicheskie zakonomernosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh. (Materialy XXXVIII Tektonicheskogo soveshchaniya)* [Tectonics of the Earth's crust and mantle. Tectonic patterns of distribution of mineral deposits. (Proc. the XXXIV Tectonic Meeting)]. Moscow, GEOS Publ., 2005, vol. 2, pp. 361–365. (in Russian)
 30. Nesmeyanov, S., Voeikova, O. Suture zones as upper crustal seismogenerating structures. In: *Natural Hazards and Risk Research in Russia*. Springer Int. Publ., 2018, pp. 205–219.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.248.2

ОПЫТ СТРУКТУРНО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ В ЦЕЛЯХ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ

© 2023 г. Н. В. Макарова^{1,*}, В. М. Макеев^{2,**}, Т. В. Суханова¹, П. С. Микляев²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

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

*E-mail: makarovanat@yandex.ru

**E-mail: vmakeev@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 16.09.2022 г.

Приводятся результаты геологических и структурно-геодинамических исследований районов размещения некоторых атомных станций, находящихся на Восточно-Европейской платформе. Рассматривается влияние геологического строения, литологии отложений, новейших тектонических движений и созданных ими структур и рельефа, в целом представляющих геологическую среду, на устойчивость территорий атомных станций. Установлено, что основными причинами негативных процессов, связанных с осадками и кренами зданий и сооружений АЭС, являются структурно-геодинамические условия, особенно современные напряжения растяжения, вызывающие повышенные трещиноватость пород и газо-флюидную проницаемость, суффозию, карст и оползание. Этому благоприятствуют тектонические наклоны площадок в сторону опускающихся впадин, песчаные основания площадок, наклон глинистых водопоров, колебания уровней прилежащих водохранилищ, наличие “гидрогеологических окон”, погребенный рельеф и современные структурно-геодинамические условия — тектонические напряжения, во многих случаях напряжения растяжения. Наряду с решением практических задач, затронут ряд теоретических вопросов — сопоставление линейментов с трещиноватостью разновозрастных пород и погребенными разломами фундамента, влияние последних на формирование новейших структур, выделение новых платформенных структур — гравитационно-тектонических массивов и впадин типа пулл-апарт.

Ключевые слова: современная геодинамика, растяжение, источники тектонических напряжений, разрывы, песчано-глинистые отложения, погребенный рельеф, линейменты, трещиноватость, пулл-апарты, экзогенные процессы, суффозия

DOI: 10.31857/S0869780923010071, EDN: HSNIDJ

ВВЕДЕНИЕ

Геологическая устойчивость территории — способность сохранять геологическую, тектоническую, геоморфологическую, гидрогеологическую и др. обстановки при воздействии современных процессов (агентов, факторов) природного (землетрясения, наводнения, опасные экзогенные процессы и др.) и техногенного происхождения (строительство различных объектов, колебания уровней водохранилищ, утечки воды из коммуникаций и др.). Оценка устойчивости — это научное обоснование безопасности территорий размещения особо опасных и технически сложных объектов: реакторных отделений, шахт, глубоких карьеров, высоконапорных плотин, высотных зданий и др. Их безопасность зависит от

разноплановой и разнотипной реакции геологической среды (отклик среды, по Ю.К. Шукину) на воздействие природных и техногенных процессов.

Статья основана на многолетних полевых и камеральных исследованиях, проведенных авторами в последние годы в районах и непосредственно на площадках проектирующихся, строящихся и действующих атомных электростанций (далее АЭС): Нижегородской, Курской 1 и 2, Белорусской, Ростовской и Нововоронежской АЭС-2, а ранее Крымской и Бушерской. Все они находятся в пределах Восточно-Европейской платформы, за исключением Крымской и Бушерской (Иран), что определяет специфику геологического строения территорий — фундамент, находя-

щийся на разной глубине от земной поверхности и перекрывающий его со стратиграфическим перерывом осадочный чехол различной мощности. Наличие в составе чехла песчаных, глинистых и карбонатных пород имеет большое значение для оценки устойчивости сооружений к возможным осадкам и кренам.

Работы проводились с целью выбора площадок под строительство новых АЭС, уточнения тектонических условий и выяснения причин активных геологических процессов на действующих АЭС, в том числе в связи с возведением дополнительных реакторных отделений. Помимо российских АЭС, предварительные геологические и тектонические исследования были проведены в районах проектируемых зарубежных Центров ядерных научных и технологических исследований (ЦИНТ) Боливийского в Южной Америке, Замбийского в Южной Африке и Бангладешского на северо-востоке полуострова Индостан.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные методы исследований:

1. Структурно-геоморфологический, позволивший определить, в пределах каких региональных и локальных новейших структур расположены площадки различных АЭС, а также формы рельефа, являющиеся показателями проявления современных тектонических процессов.

2. Литологический метод включал изучение отложений, являющихся основанием площадок, их вещественного состава, фаций, трещиноватости, определение участков неустойчивого их состояния, способного вызвать развитие и активизацию суффозии, оседания и других процессов.

3. Структурно-кинематический, включающий изучение трещиноватости пород, определение типов трещин, построение стереограмм с показом осей тектонических напряжений и реконструкции полей напряжения.

4. Геохимический, заключающийся в применении радоновой съемки в зонах предполагаемых разрывных нарушений.

5. Структурно-геодинамический, позволяющий на основании результатов, полученных разными методами, определить современные геодинамические условия территорий АЭС и прогнозировать развитие процессов, вызывающих негативные явления на площадках.

Все методы применялись в комплексе с данными бурения, гидрогеологии, геофизики, геодезии с учетом техногенного фактора.

С целью выяснения причин проявления негативных процессов, механизмов их развития и выработки рекомендаций по снижению их негативного влияния на площадку АЭС, структурно-

геодинамические исследования были сгруппированы в три блока [3, 7]. В первом блоке рассматривается геологическое строение, и, в первую очередь, литология отложений площадки АЭС, структурно-геоморфологические и гидрогеологические условия района. Во втором и третьем блоках исследуются неотектоника и геодинамические условия формирования структур. Во всех блоках исследования учитывались основные факторы, влияющие в комплексе или по отдельности на устойчивость территорий к негативным современным геологическим процессам. Исследования проводились в разных масштабах — региональном на территории в радиусе 30–50 км от площадки АЭС, и детальном в радиусе 3–5 км, включающим площадку и ее окрестности. На основе оценки различных факторов была сформулирована “Основа концепции геодинамической безопасности экологически опасных сооружений”.

В целях определения устойчивости сооружений АЭС нами оценены следующие факторы: 1) вещественный состав пород или литология отложений, 2) структурно-геоморфологические условия, 3) гидрогеологические условия и 4) структурно-геодинамические условия. Кроме того, получены данные, имеющие теоретическое значение для новейшей тектоники платформ и, в частности, Восточно-Европейской.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вещественный состав пород или литология отложений

Лессовые образования. Обычно геологические разрезы отложений на территориях АЭС начинаются сверху покровными четвертичными образованиями, в составе которых лессы или лессовидные суглинки, разделенные горизонтами погребенных почв. Их мощность больше на древних высоких геоморфологических поверхностях, минимальны на молодых низких. Лессы и суглинки известковистые, пористые, трещиноватые, что, как известно, вызывает при их намокании образование просадок на поверхности, развитых во всех исследованных районах. Это способствует скоплению поверхностных вод в понижениях, их инфильтрации в подстилающие отложения, особенно в пески, и развитию суффозии. При строительстве котлованов под сооружения и выравнивании площадок покровные образования срезаются, и тогда основанием площадок являются пески разного генезиса, или подстилающие их коренные породы.

Песчаные отложения. Одно из условий при выборе районов для строительства АЭС, помимо безопасности в отношении разломов и сейсмичности, прочности динамических свойств грунтов,

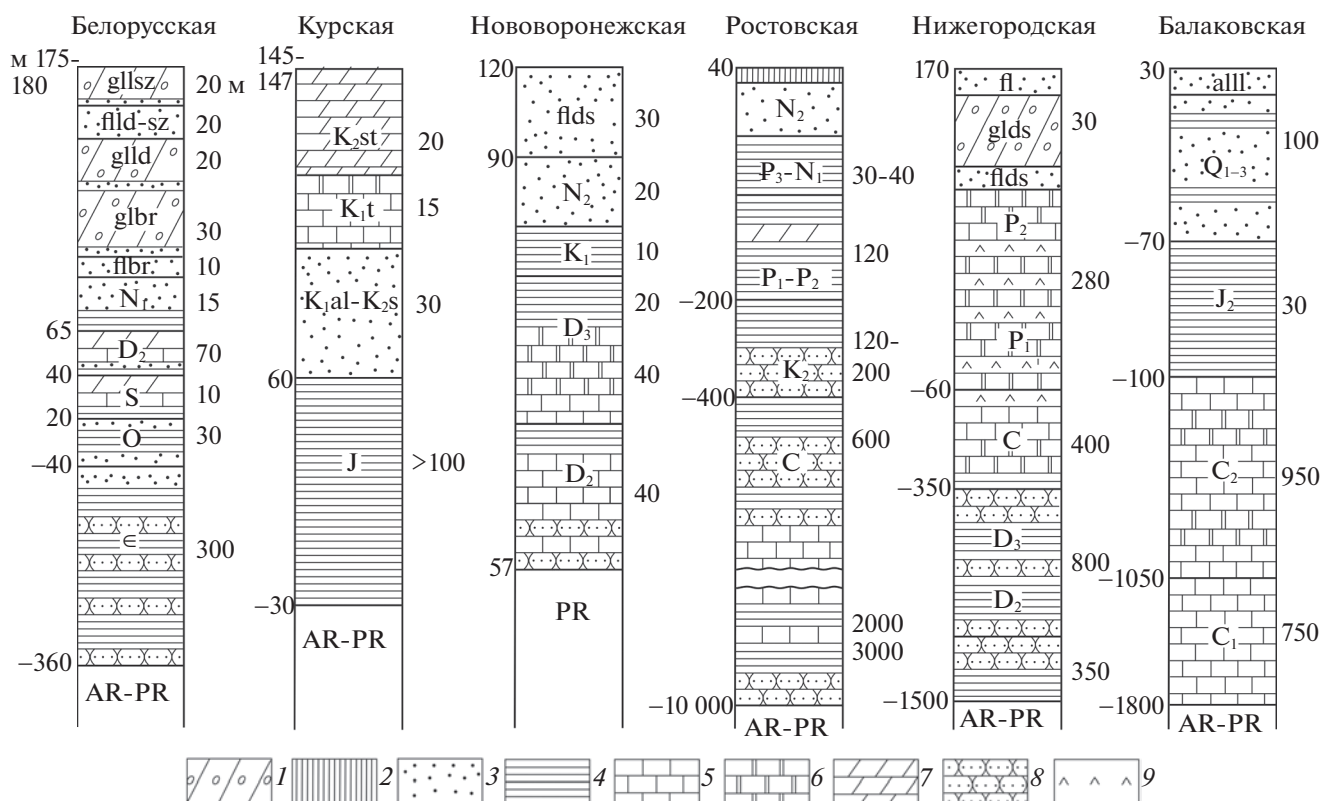


Рис. 1. Схематические разрезы отложений в районах размещения площадок некоторых атомных станций: 1 – ледниковые отложения (морена); 2 – покровные суглинки; 3 – пески, супеси, 4 – глины; 5 – известняки; 6 – доломиты; 7 – мергели; 8 – песчаники; 9 – гипсы, ангидриты. Цифры слева от колонок – гипсометрические отметки кровли слоев (в метрах), справа – мощность слоев (вертикальный масштаб не выдержан). Геологические индексы: морены различного возраста четвертичных оледенений: glds – донского, glld – днепровского, glbr – березинского, gllsz – сожского; флювиогляциальные отложения оледенений: flds – донского, flbr – березинского, flisz – сожского; N_1 – миоцен, N_2 – плиоцен, N_1-P_3 – олигоцен-миоцен, P_1-P_2 – ранний-средний палеоген, K_2 st – верхний мел сантонский ярус, K_2 – верхний мел, J – юра, P_2 – средняя пермь, D_2 – средний девон, D_3 – верхний девон, S – силур, O – ордовик, ϵ – кембрий, V – венд, $A-PR$ – архей-протерозой.

служащих основанием зданий и сооружений, – потребность использовать воду для охлаждения реакторов. Поэтому многие АЭС построены в речных долинах (Балаковская, Курская, Воронежская, Чернобыльская, Ровенская и др.), на берегах водохранилищ (Ростовская, Белоярская, Смоленская и др.) или озер (Калининская, Кольская и др.), часто наследующих прогибы. Основными формами рельефа в таких местах являются поймы и террасы рек (и озер), флювиогляциальные долинныя задрры, сложенные обычно песками (рис. 1).

Пески, слагающие грунтовое основание многих площадок АЭС, неоднородны по механическому и фациальному составу, изменяющемуся по латерали и вертикали, что связано с отложением их при разных динамических режимах потоков в различных по размеру руслах, постоянно меняющих свое положение. Большие врезанные палеорусла заполнены крупным песком с гравием и галькой, в меньших по размеру руслах песок средне- и мелкозернистый. Скважины вскрывают па-

леорусла в разных ракурсах – вдоль простираия, тогда в разрезе появляются протяженные горизонтальные слои, или поперек сечений русел, что выражается линзами. Иногда наблюдаются “столбчатые” формы неоднородностей песка, предположительно заполняющие вертикальные трещины. По таким неоднородностям вода может фильтроваться вниз, вынося мелкий материал к подошве песчаной толщи. Среди песков есть прослои тонких осадков – супесей, суглинков, глин пойменных, старичных или озерных фаций. Во всех случаях фильтрационные свойства разных литологических неоднородностей различны.

Глины палеоген-неогеновые на Ростовской, меловые на Курской и Нововоронежской АЭС-2 и др. являются водоупором для подземных вод и вызывают обводнение нижних частей залегающих на них песчаных толщ.

Карбонатные (известняки, доломиты, мергели, мел) или сульфатные (гипсы, ангидриты) породы. Их поверхность обычно трещиноватая, разру-

шенная, с корой выветривания или закарстованная во время продолжительных континентальных перерывов, существовавших до перекрытия их более молодыми отложениями. Так, в разрезе отложений Нововоронежской АЭС-2 верхнедевонские известняки перекрыты нижнемеловыми глинами, а на Нижегородской АЭС на нижнепермских гипсах залегают четвертичные отложения. Местами глинистая покрывка отсутствует, и с карбонатами или сульфатами соприкасаются пески (Нововоронежская АЭС-2). При этом трещиноватость и закарстованность пород ведет к суффозии в перекрывающих их песках, образованию на поверхности просадок, вплоть до воронок [16].

Структурно-геоморфологические условия

Большая часть площадок АЭС в структурном отношении расположена в новейших прогибах, реже на поднятиях, развивающихся в настоящее время. Следствием активных деформаций является активизация различных экзогенных и эндогенных процессов, в том числе интенсивных, часто скрытого характера. Большое значение для их выявления имеет анализ поверхностного и погребенного рельефа на основе полевых наблюдений, бурения и геофизики.

Поверхностный рельеф. Потенциально опасными для развития суффозии на территориях АЭС являются: 1) ложбины, овраги, замкнутые понижения, в том числе на поймах рек, на которых расположены некоторые сооружения станций; 2) основания склонов террас и их тыловые швы, где при выполаживании продольных профилей русел оврагов и ложбин, расчленяющих склоны, или выклинивания грунтовых вод создаются условия для инфильтрации воды вглубь песчаных отложений.

Погребенный рельеф. Негативными для площадок АЭС являются неровности в кровлях пород разного возраста, выявляемые бурением и геофизикой в виде ложбин, русел и долин (коротко палеоврезы). Их образование связывается с континентальными перерывами в развитии территорий в дочетвертичное и четвертичное время. Палеоврезы заполняются осадками водных потоков, имеющими иной механический состав в сравнении с вмещающими породами. Примерами являются различной ширины и глубины ложбины на эрозионных поверхностях карбонатных пород среднего девона и палеорусл плиоценового Дона в поверхностях нижнего мела. Палеоруслы были вскрыты на глубине 45–50 м от земной поверхности под четвертичными отложениями на площадке Нововоронежской АЭС-2 (рис. 2) и на поверхностях верхнеолигоцен-нижнемиоценовых глин на площадке Ростовской АЭС.

Другой пример погребенного эрозионного рельефа — ложбины стока, расчленяющие частично

погребенный склон II позднечетвертичной террасы Дона, на которой расположена площадка Ростовской АЭС. Здесь пойма, I терраса и часть склона II террасы затоплены водами Цимлянского водохранилища. В него по погребенным ложбинам выносятся песчаный материал, что активизирует суффозию в верхней части плиоценовой песчаной толщи, служащей грунтовым основанием площадки АЭС. Это, возможно, является одной из основных причин осадок и кренов некоторых сооружений, находящихся над погребенными ложбинами стока (рис. 3) [6].

Кроме эрозионного рельефа погребенными являются карстовые формы — пустоты, каверны в карбонатных верхнедевонских породах на территории Нововоронежской АЭС-2, или воронки в пермских сульфатных породах на территории проектировавшейся Нижегородской АЭС в низовьях р. Ока и др. В последнем случае ее строительство из-за погребенного и поверхностного карста приостановлено.

Гидрогеологические условия

Пески вмещают грунтовые и более глубокие горизонты подземных вод. На контакте с глинистым водоупором пески водонасыщены, что при наклоне поверхности водоупора (тектоническим или эрозионным) является причиной их сползания. Возможно, это явление происходит в западной части площадки Ростовской АЭС, где смещение поверхностных геодезических реперов к юго-западу совпадает с наклоном в том же направлении водоупора — верхнеолигоцен-нижнемиоценовых глин, перекрытых верхнеплиоценовыми песками.

Часто бывает обводнена не только нижняя часть толщ песков, залегающих на водоупоре, но увлажнены и верхние их части. Это связано с подтоплением песков при подпруживании грунтовых вод ростом молодых поднятий (Курская АЭС-2) [4, 6], сезонным повышением уровня воды в руслах рек (Дон на Нововоронежской АЭС-2), в водохранилищах (Цимлянское на Ростовской АЭС, Саратовское на Балаковской АЭС) и водоохладительных бассейнах для реакторов.

Целостность водоупорного горизонта, разделяющего грунтовые и более глубокие межпластовые воды, бывает тектонически нарушенной вследствие наличия зон повышенной трещиноватости, например, открытого типа. Интенсивный забор вод для питьевых и хозяйственных нужд приводит к возникновению гидрогеологических окон в связи с обменом этих вод и образованию фильтрационных воронок. При техногенных утечках воды и прочих факторах образуются участки с избыточным обводнением в виде куполов растекания. Все эти нарушения приводят к суффозии в песчаной толще (Нововоронежская АЭС-2).

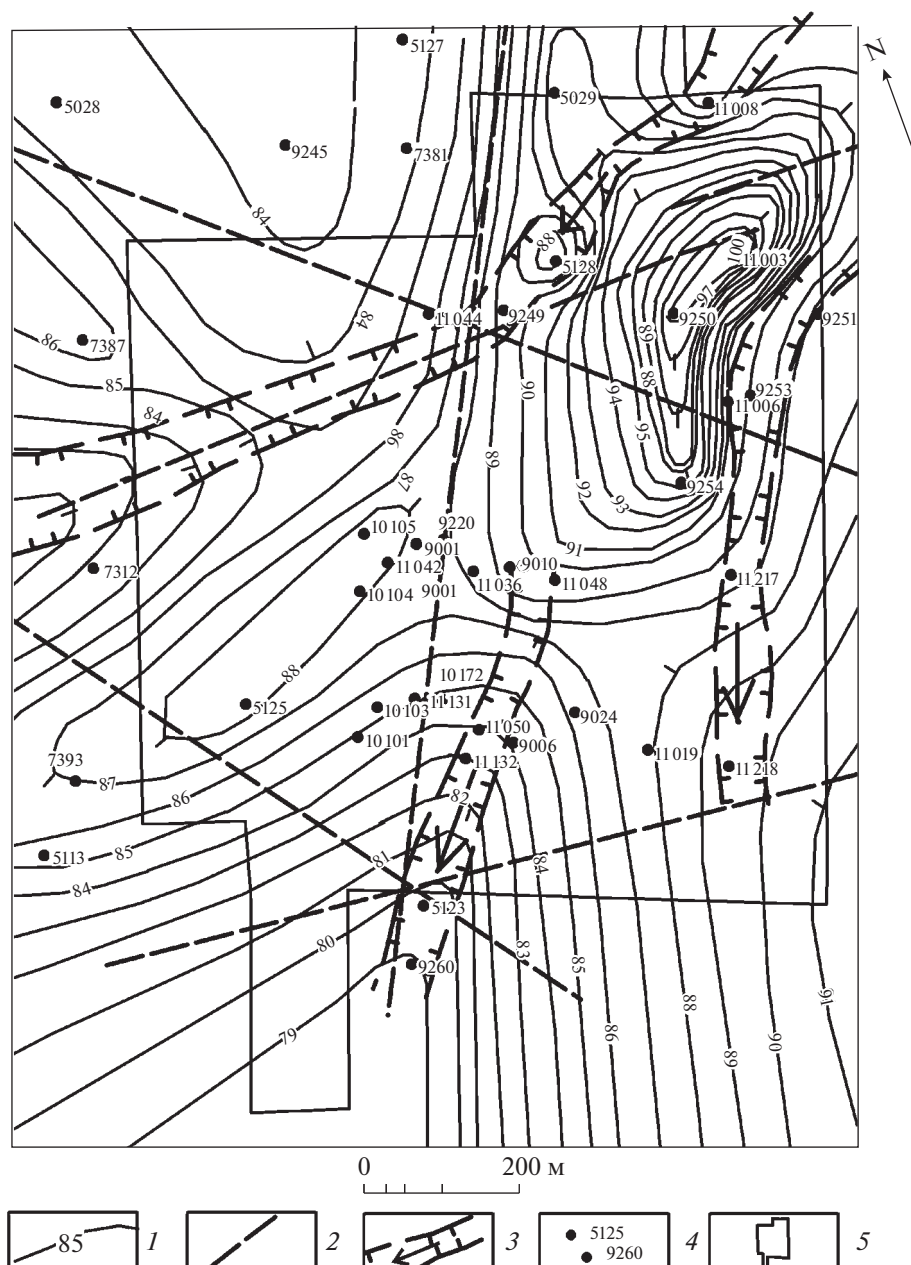
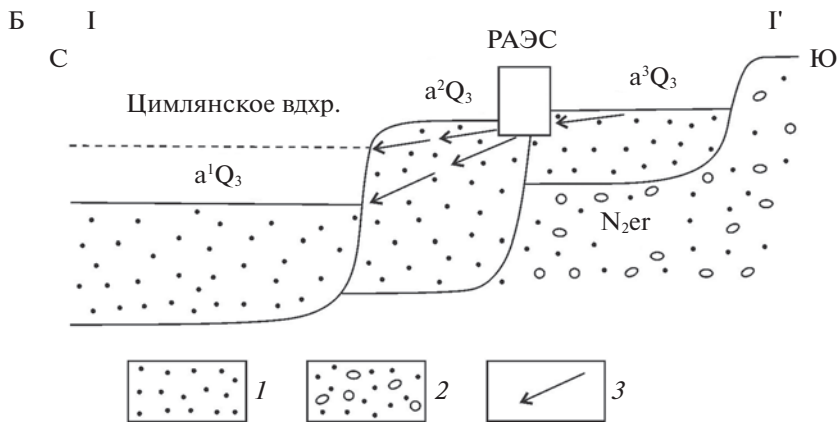
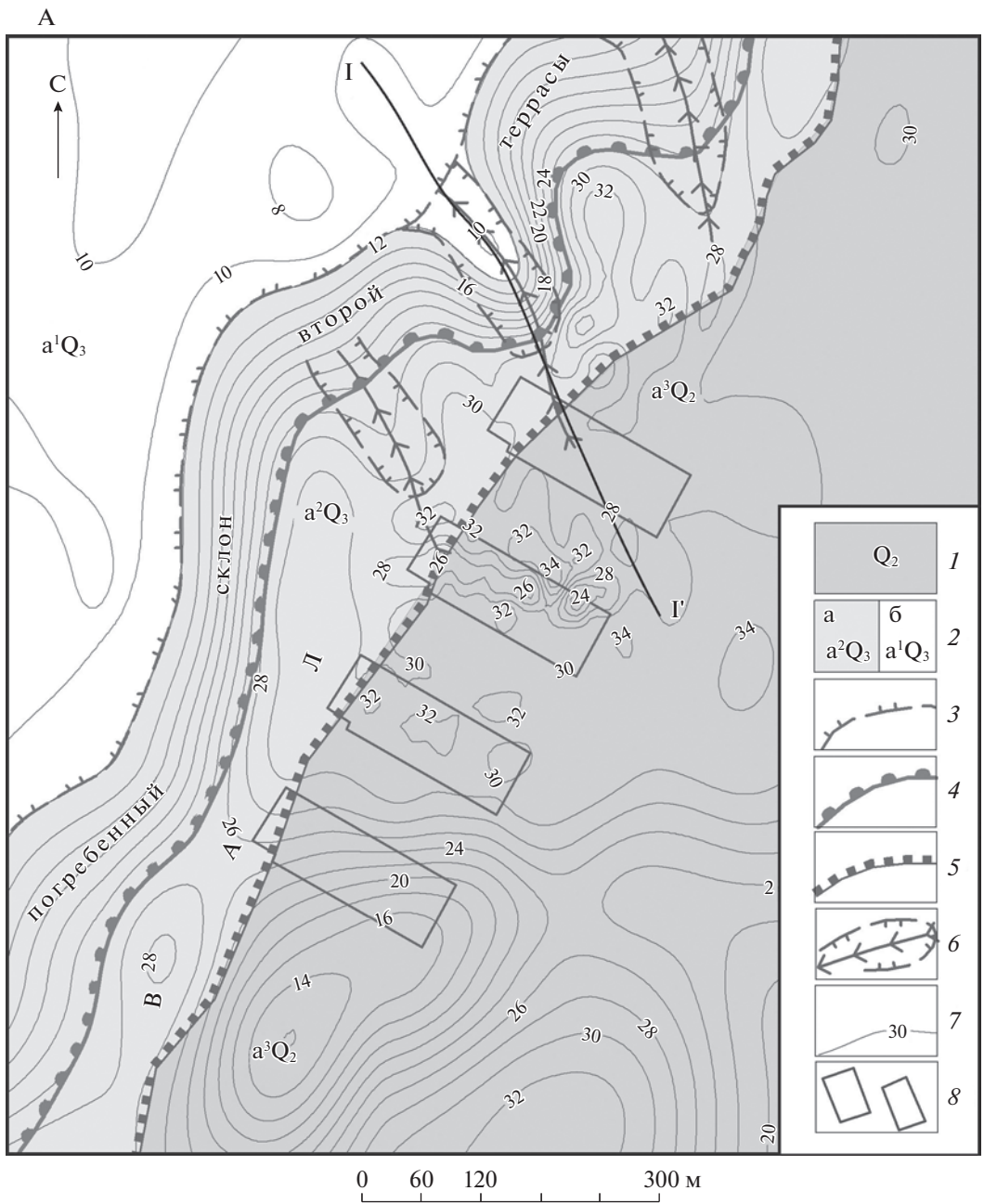


Рис. 2. Палеорука Дона в рельефе кровли плиоценовой кривоборской свиты (aN_2), выделенные по данным бурения, местами совпадающие с линеаментами. 1 – изогипсы кровли поверхности кривоборской свиты; 2 – линеаменты, выделенные на земной поверхности; 3 – погребенные русла и направления их снижения (показаны стрелкой); 4 – номера скважин; 5 – контуры площадки Нововоронежской АЭС-2.

Структурно-геодинамические условия

Геодинамика предполагает выявление источников тектонических напряжений, воздействующих на геологическую среду и вызывающих формирование региональных и локальных тектонических структур (поднятий, опусканий, складчатых и разрывных). Разноранговые структуры, на которых или в пределах которых размещаются различные, в том числе экологически опасные промышленные объекты, развиваются с разными

скоростями. Основанием этих объектов являются древние структуры кристаллического фундамента и чехла, включая разрывные, образованные в доновейшие эпохи активизации тектонических движений, и новейшие структуры, особенно четвертичные. Древние и новейшие структуры часто являются несогласными, образуя структурные планы перекрестного характера, поскольку они формировались в разное время и под действием различных источников напряжений. Такое несо-



гласование структур наблюдается на территориях Курской, Ростовской и др. АЭС [4, 6, 7].

Так, новейшее *субширотное* Сальско-Донское поднятие, в пределах которого находится Ростовская АЭС, и сопряженные с ним Цимлянский и Сальский прогибы, на всем протяжении не согласуются по простиранию с *северо-западным* простиранием структур кристаллического фундамента, находящегося на глубине не более 10 км. Эти поднятия и прогибы также не согласуются по простиранию с палеозойскими структурами вала Карпинского (погребенного продолжения открытых складчатых структур Донбасса), меловыми и палеогеновыми структурами осадочного чехла [13]. Рассматриваемые поднятия и прогибы часто развиваются не конформно над древними синклиналями, антиклиналями и моноклиналями. Лишь иногда наблюдается частичное совпадение структур по знаку движения: молодые поднятия развиты над поднятыми блоками фундамента, образуя штамповые структуры [15] (Курская АЭС), или над сводом или крылом меловой антиклинали (Ростовская АЭС). В целом рассогласованность структур глубинных горизонтов определяет разную их реакцию на неотектонические поля напряжений. Это может вызывать добавочные напряжения сдвигового типа, образование трещиноватости в породах и разрывов, снижение физико-механических свойств грунтов, являющихся основанием площадок.

Современные локальные развивающиеся поднятия и опускания, еще не выраженные в деформациях земной поверхности, часто являются причиной развития негативных процессов: подпруживания стока поверхностных и подземных вод, заболачивания и подтопления территорий, повышенной аккумуляции аллювия в долинах рек, активного развития эрозионных форм и т.д. Все эти явления наблюдаются на территории, прилегающей к площадке Курской АЭС-2.

Современная геодинамика определяет напряженное состояние пород на территориях расположения АЭС: условия сжатия, растяжения, сдвига и др., в которых формируются и развиваются новейшие, в том числе четвертичные структуры. Локальные источники или причины этих напряжений редко кем рассматриваются, тем не менее, они могут негативно сказаться на устойчивости сооружений. Сдвиговые напряжения при горизонтальном растяжении проявляются образованием кулисно расположенных впадин типа пулл-апарт [1, 10] с расширенными поймами и

повышенной мощностью аллювия (территории Нововоронежской, Курской и др. АЭС) (рис. 4). В условиях напряжений растяжения трещиноватость, фиксируемая на поверхности, в том числе выходами родников, аномалиями радона (Курская, Белорусская АЭС), а в погребенных породах геофизическими данными [14] и бурением, становится более открытой и проницаемой для водно-газовых флюидов [11, 12]. Подобного типа трещиноватость проявляется на границах крупных поднятий и впадин. Так, на восточном склоне Воронежского новейшего поднятия в районе Нововоронежской АЭС-2 и южном его склоне в районе Курской АЭС-2 меловые породы интенсивно разбиты системами трещин. Структурно-кинематический (парагенетический) анализ трещин и линеаментов подтвердил активность напряжений растяжения со сдвиговой компонентой. В этих условиях, помимо трещиноватости пород, широко развиты оползни, обвалы, карст, суффозия, восходящие родники, наблюдаемые в районах размещения и непосредственно на площадках АЭС. Кроме того, намечаются крупные массивы дробления и оползания пород гравитационно-тектонического происхождения, которые сопровождаются образованием протяженных трещин будущего отседания (см. рис. 4).

От границ фронта оползания трещины отседания могут отстоять на десятки километров. Примером является массив на правом берегу Дона в районе Нововоронежской АЭС, будущими трещинами отседания которого служат долины рек Девица, Россoshка и др.

Иногда современные геодинамические условия сложны, и их трудно определять. Например, территория размещения Ростовской АЭС, которая находится на Сальско-Донском поднятии. В его формировании участвуют три источника тектонических напряжений: с юга действует давление, наведенное со стороны развивающегося поднятия Кавказа, с севера — давление от вала Карпинского, а с востока — со стороны активного Каспийского прогиба. В результате здесь развиты структуры, в морфологии которых отражены все три источника напряжений, но превалирует давление со стороны Кавказа. Следствием является субширотное простирание основных структур, северо-западная ориентировка локальных структур, а влияние Прикаспия отражено в появлении секущих субмеридиональных структур, прослеживаемых на десятки километров от прогиба.

←

Рис. 3. Карта-схема (А) рельефа площадки Ростовской АЭС, составленная по данным бурения: 1, 2 — поверхности террас Дона: 1 — среднего неоплейстоцена (III и IV террасы нерасчлененные Q_2), 2 — позднего неоплейстоцена (а — II террасы a^2Q_3 , б — затопленной I террасы a^1Q_3); 3 — граница I террасы; 4 — бровка частично погребенного склона II террасы; 5 — граница между II и III террасами; 6 — погребенные ложбины в уступе II террасы с направлением суффозионного выноса; 7 — изогипсы поверхности ергенинской свиты (Neg); 8 — энергоблоки РАЭС. Б — геологический разрез по линии I-I': 1 — пески; 2 — разнородные пески; 3 — направление суффозионных процессов.

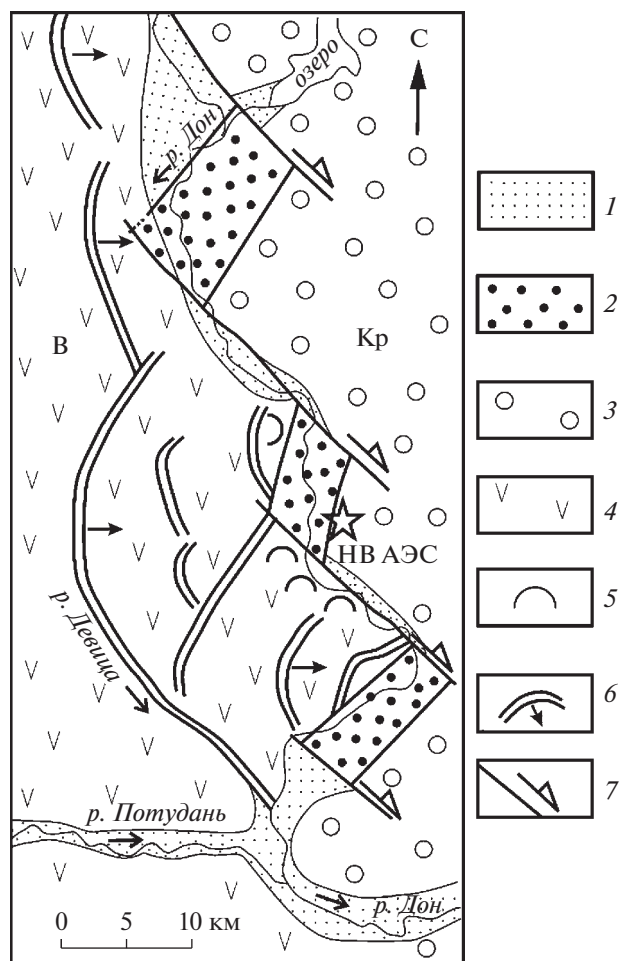


Рис. 4. Строение долины р. Дон в районе Нововоронежской АЭС: 1 – аллювий р. Дон; 2 – расширенные участки долины, интерпретируемые как пулл-апараты; 3 – отложения, слагающие Кривоборский прогиб (Кр); 4 – отложения, слагающие восточное крыло Воронежского поднятия (В); 5 – оползневые склоны; 6 – границы предполагаемых тектоно-гравитационных массивов; 7 – сдвиговые деформации.

Геодинамически-активные зоны (ГДАЗ). Особое значение имеет приуроченность речных долин с расположенными в них АЭС к зонам новейших прогибов (опусканий), являющихся геодинамически активными зонами [2, 5]. Последние разграничивают области, развивающиеся под действием разнотипных напряжений. Некоторые примеры: *Нижнеокский* прогиб (восточнее Москвы) разделяет новейшие поднятия Токмовского свода (на его северном склоне находится территория Нижегородской АЭС) и Окско-Цнинский вал. Субширотное сжатие с запада со стороны расширяющегося Окско-Цнинского вала вместе с давлением с юга со стороны растущего Токмовского свода обуславливает образование зоны левосдвиговых напряжений, наследуемой Нижнеокским прогибом и р. Ока. Влиянием свода объ-

ясняется подворот к югу западных окончаний широтных структур свода. При этом “накачивание” прогиба на структуры сопровождается подмывом Окой высокого правобережья и образованием оползней. Рост поднятий ведет к понижению уровня подземных вод и связанному с этим широкому проявлению карста на территории АЭС.

Кривоборский плиоценовый прогиб (верховье Дона), в западной части которого находится территория Нововоронежской АЭС, разделяет две крупные новейшие, различно развивающиеся структуры – Воронежское поднятие и Окско-Донской прогиб. Последний рассматривается как широкая субмеридиональная протяженная геодинамически активная зона, в которой формируются современные зоны поднятий и прогибов меньшего ранга. Смещение прогиба к западу на склон Воронежского поднятия, происходящее в течение всего новейшего этапа, вызвано ростом на востоке Приволжского поднятия и пододвиганием земной коры прогиба под Воронежское поднятие. В Кривоборском прогибе проявлены условия растяжения с правосдвиговой компонентой, вызывающей образование впадин типа пулл-апарат. Развитие трещин растяжения сопровождается негативной активностью карста, оползней и суффозии. Все эти явления характерны для ближнего района (радиус 30 км) Нововоронежской АЭС.

Амплитуды и скорости развития структур. Амплитуды новейших поднятий на Восточно-Европейской платформе редко превышают 220 м. Поэтому общей закономерностью являются близкие значения скоростей поднятий за весь новейший этап (30–35 млн лет), всего около 0.01 мм/год. Рассчитанные нами скорости за отдельные четвертичные стадии (ранний, средний, поздний неоплейстоцен), продолжительность которых первые сотни-десятки тысяч лет) колеблются от 0.2 до 0.8 мм/год, а в голоцене увеличиваются до 2–4 мм/год. Постоянные детальные геодезические измерения на площадках всех АЭС выявляют современные дифференцированные тектонические движения. Так, вертикальные движения отдельных участков обычно не превышают 1–2 мм/год, составляя ± 0.5 мм/год на Нововоронежской, от ± 0.14 –0.58 до ± 2.5 –4.6 мм/год на Ростовской АЭС-2 и др. В то же время под отдельными зданиями и сооружениями или дамбами скорости опускания увеличены до 15–25 мм/год, а иногда и более, что объясняется осадками грунтового основания под объектами. Горизонтальные движения также дифференцированы и вызваны в основном напряжениями растяжения или сжатия вследствие давления со стороны основных региональных источников напряжения или другими причинами. Так, в восточной части площадки Ростовской АЭС отмечается смещение реперов к СВ со скоростью 26 мм/год, а в западной ее части – к ЮЗ со скоростью 16–20 мм/год. В послед-

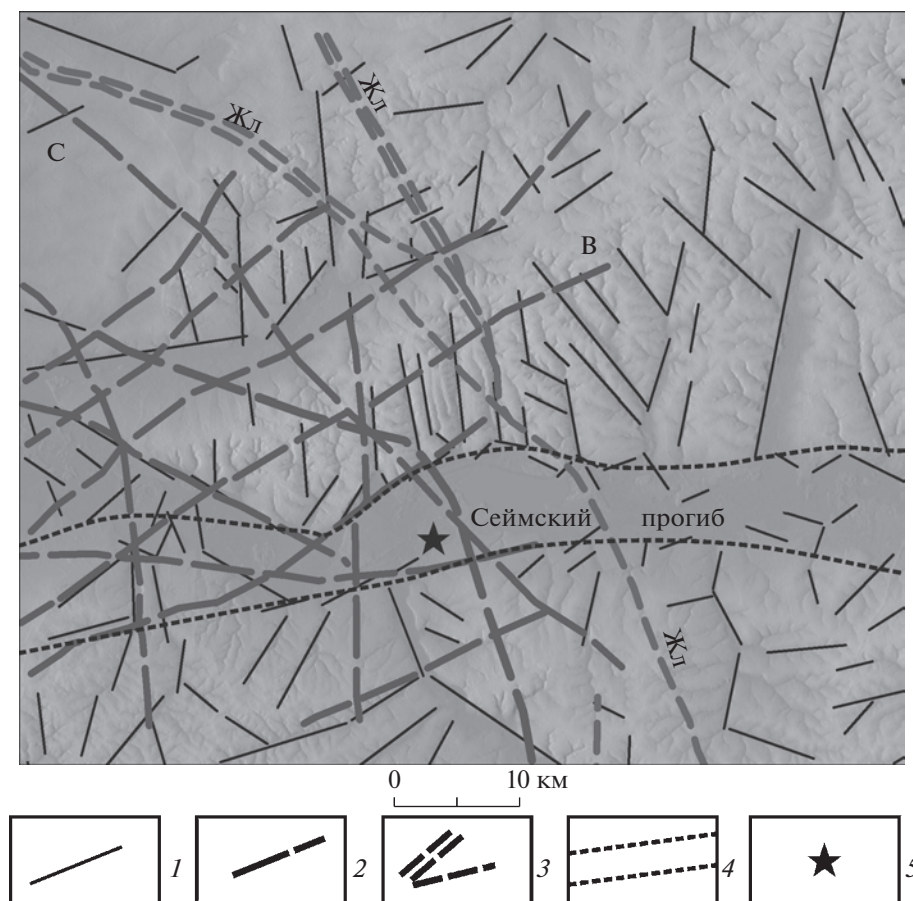


Рис. 5. Соотношение линеаментов и разломов фундамента на южном склоне Воронежского поднятия (В): 1 – линеаменты; 2 – предполагаемые разломы фундамента; 3 – зона Железногорского разлома (Жл); 4 – границы Сеймского прогиба; 5 – площадка Курской АЭС-2.

нем случае это может быть связано с наклоном водоупора – подстилающих олигоцен-миоценовых глин, и деформациями залегающих на них плиоценовых песков, о чем было сказано выше.

Линеаменты, трещиноватость пород и разломы. Линеаменты на территориях АЭС выделяются, как и везде, по данным дешифрирования топографических карт, цифровых моделей рельефа, космо- и аэрофотоснимков. В основном все они выражены различными по протяженности прямолинейными отрезками русел рек и ручьев, ложбин, оврагов, а также различными уступами. На снимках они могут выделяться по градиенту изменения фототона. По установившемуся мнению, линеаменты проявляют трещиноватость пород или более крупные дислокации – погребенные разломы кристаллического фундамента, древние или омоложенные, но редко нарушающие осадочный чехол. Из огромного их числа, образующих “паутину”, простираение некоторых согласно с простираением трещин в разновозрастных породах. При этом наблюдаются близкие направления с трещинами в четвертичных отложениях и лишь частично в древних отложениях –

палеогеновых, меловых, пермских и др. Небольшая часть линеаментов совпадает с палеоруслуями, выделенными бурением на погребенных поверхностях (Белорусская, Курская АЭС-2, Нововоронежская АЭС) [8, 9].

На территории Белорусской АЭС в радиусах 30 и 5 км от площадки непосредственной прямой связи линеаментов с многочисленными разломами фундамента, выделенными в основном по геофизическим данным, не установлено. Многие линеаменты протягиваются далеко от разломов фундамента, а некоторые – только от отдельных участков развиты над ними. В целом из 14 разломов фундамента лишь 4, в основном, северо-западного простираения, отражены в линеаментных.

На южном склоне Воронежского новейшего поднятия, на территории, прилегающей к Курской АЭС, преобладают линеаменты меридионального простираения, тогда как предполагаемые разломы имеют северо-восточное и широтное простираение, а известный древний Железногорский протяженный разлом фундамента, находящегося на глубине менее 200 м, – северо-западное (рис. 5).

На территории Нововоронежской АЭС по геофизическим данным выделены меридиональный и диагональный разломы [14], с которыми можно было бы, предположительно, связать негативные процессы, происходящие на площадке (оседание поверхности, крен некоторых сооружений), не выражены ни в современном, ни в погребенном рельефе, также как и в деформациях отложений. Поэтому их существование нельзя считать доказанным.

ВЫВОДЫ

Полученные данные по исследованию геологического строения и структурно-геодинамических условий районов размещения некоторых АЭС на Восточно-Европейской платформе имеют практическое и теоретическое значение. Проведенный комплекс исследований определил современные источники тектонических напряжений и созданные ими геодинамические условия, в которых находятся эти территории. Это позволяет прогнозировать развитие новейших структур и связанные с этим различные геологические процессы, в том числе негативные.

1. *Практическое значение.* Состав и строение отложений, являющихся основанием площадок АЭС, среди которых преобладают песчаные, карбонатные и глинистые породы, обуславливают развитие негативных процессов, осложняющих эксплуатацию АЭС, особенно в обстановках напряжений растяжения. Это трещиноватость пород, оползание и обваливание, карст, оседание поверхности и др. Неоднородность механического состава песчаных толщ свидетельствует о разветвленных руслах, в которых происходила аккумуляция, некоторые из которых приурочены к зонам трещиноватости. На глинистых водоупорах нижние части песчаных толщ обводнены и при достаточном уклоне поверхности глины могут смещаться, вызывая деформации поверхности. Обводнение песчаных толщ вызывается также подпруживанием стока растущими молодыми поднятиями, еще не выраженными в рельефе. Погребенные ложбины, глубокие врезы, карстовые формы влияют на гидрогеологическую обстановку, обуславливают связь грунтовых и более глубоких вод, способствующую развитию суффозии.

Таким образом, в условиях современных тектонических напряжений растяжения, вызывающих повышенную трещиноватость пород, и при негативных гидрогеологических и геоморфологических условиях, строения поверхностного и особенно погребенного рельефа, а также техногенного фактора (утечки из коммуникаций, размещения водохранилищ и прудов-охладителей) песчаные толщи особенно подвержены процессам суффозии. Этим процессам на территориях

размещения многих АЭС ранее не уделялось достаточного внимания. Именно суффозионная активность в зонах повышенной трещиноватости, а не доказанные разломы, являются одной из причин негативных процессов: оседания поверхности площадок, кренов зданий и сооружений и др.

Наблюдающаяся в настоящее время активность тектонических движений, проявленная в интенсивности эрозионных процессов, росте молодых структур, доказывает увеличением скорости поднятий. В течение отдельных отрезков четвертичного периода она колебалась от 0.2 до 0.8 мм/год, а в настоящее время составляет 2–4 и более мм/год. На фоне увеличивающейся тектонической активности структур геодезические измерения показывают дифференцированные движения в районах размещения АЭС, в том числе вызванные техногенными причинами.

2. *Теоретическое значение.* Возможность использования комплекса методов — геофизических, геодезических, бурения, геохимии, наземных исследований и др. — на территориях размещения АЭС позволили затронуть ряд вопросов теоретического характера. К ним относится представление о связи линеаментов с зонами трещиноватости пород и погребенными разломами фундамента. При сопоставлении линеаментов с трещиноватостью разновозрастных пород, чаще наблюдается их связь с трещиноватостью четвертичных отложений и реже с более древними породами. Возможно, это объясняется тем, что линеаменты являются новейшими, а трещиноватость дочетвертичных пород отражает геодинамические обстановки прежнего донеотектонического времени.

Не всегда, как утверждает многими исследователями, линеаменты отражают разломы фундамента, выделенные по геофизическим данным. Примером является южное крыло Воронежской антеклизы, где преобладающие здесь меридиональные линеаменты не согласны по простиранию с СВ и СЗ простираниями древних разломов, в том числе Железнодорожного, пересекающего территорию Курской АЭС. На территории, прилегающей к Белорусской АЭС, из более, чем десяти разломов, выделенных в кристаллическом фундаменте, с линеаменами прямо сопоставляются лишь четыре. Большая часть разломов фундамента не находит отражения в поверхностном и погребенном рельефе и не подтверждается бурением. Субъективизм в выделении линеаментов затрудняет реально оценивать их связь с разломами, а преувеличение роли последних в новейшее время иногда не позволяет видеть другие причины развития негативных процессов.

Меняющиеся на протяжении фанерозоя и, в том числе, на новейшем этапе, геодинамические обстановки, связанные с влиянием различных

источников тектонических напряжений, действующих в разное время, обуславливают образование разноглубинных и разновозрастных структурных планов, часто перекрестных, не согласующихся между собой. Поэтому связь новейших структур со структурами фундамента не всегда подтверждается. Одним из примеров этого является территория размещения Ростовской АЭС, где структуры фундамента, палеозойские, мезозойские и новейшие не согласуются между собой.

Исследования на территориях, прилежащих к АЭС, позволили выделить новые для Восточно-Европейской платформы структуры и подтвердить существование ранее выделенных структур. К новым структурам относятся крупные гравитационно-тектонические массивы, образованные в условиях напряжений растяжения на границах некоторых платформенных поднятий и опусканий. Это массивы потенциального будущего дробления пород и их сползания или обрушения в прилегающий прогиб. В тыловой части они ограничены, как и современные оползни, циркулярными формами, а также линейными долинами или только намечающимися понижениями — будущими трещинами отседания. Последние выделяются на расстоянии десятков километров от границы с прогибами.

Условия растяжения со сдвиговой компонентой приводят к образованию в долинах рек локальных впадин типа пулл-апарт, ранее (за исключением отдельных исследований) не выделявшихся на Восточно-Европейской платформе. Для них характерны кулисное сочленение, расширенная пойма, повышенная мощность аллювия.

Рассмотренные выше проблемы выделения линеаментов, разломов, трещиноватости пород, новейших структур и их соотношения с древними, донеотектоническими дислокациями требуют дальнейшего изучения с привлечением всех методов, особенно бурения и геофизики.

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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копп М.Л. Дугообразные структуры растяжения в кинематике региональных и глобальных тектонических обстановок // Геотектоника. 2017. № 5. С. 18–36.
2. Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М. Современные геодинамически активные зоны платформ // Геоэкология. 2007. № 2. С. 99–110.
3. Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Микляев П.С., Коробова И.В. Новейшая тектоника и геодинамика Нижнеокского региона (Русская плита) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2012. № 4. С. 4–11.
4. Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Коробова И.В., Карфидова Е.А. Новейшая тектоника и геодинамика юго-западного крыла Воронежской антеклизы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 1. С. 10–19.
5. Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л., Суханова Т.В., Коробова И.В. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2016. Т. 91. Вып. 4–5. С. 9–26.
6. Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Гусельцев А.С. Геологические условия развития суффозионных процессов и их современная активизация на Сальско-Донском поднятии (район Ростовской АЭС) // Геоэкология. 2019. № 6. С. 19–29.
7. Макеев В.М. Структурно-геодинамические условия устойчивости особо опасных и технически сложных объектов на древних платформах: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук: М.: ООО “Ай-клуб”, 2015. 50 с.
8. Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Коробова И.В. Структурно-геоморфологическая характеристика и четвертичные отложения Островецкого района (Беларусь) // Сб. статей VIII Всерос. совещ. по изуч. четвертичн. периода. Ростов-на-Дону. Изд. ЮНЦ РАН. 2013. С. 404–406.
9. Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В. Структурно-геоморфологические и геодинамические условия территории размещения Нововоронежской АЭС-2 // XXII Всерос. с межд. участием научно-практ. Шукинская конф. Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2020. С. 215–218.
10. Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В. Современная геодинамика и неотектоника центральной части Русской равнины // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики: матер. ЛП Тектонического сов. М.: ГЕОС, 2020. Т. 2. С. 67–72.
11. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Изд-во “Перо”, 2016. 394 с.
12. Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Петрова Т.Б. Комплексные мониторинговые исследования радонового поля грунтовых массивов. Основные результаты // АНРИ. 2017 № 4 (91). С. 2–22.
13. Новейшая тектоника и геодинамика: обл. сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты / Отв. ред. Ю.К. Шукин. М.: Наука, 2006. 206 с.
14. Спунгин В.Г., Бурчик В.А., Скворцов А.Г. Сейсмические сигналы в пределах площадки НВ АЭС-2 и их связь с особенностями строения геологической среды // Структура, свойства, динамика и минерализация литосферы Восточно-Европейской платформы. Воронеж: Научная кн., 2010. Т. 2. С. 245–250.
15. Трегуб А.И. Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива // Тр. НИИ Геол. Воронеж. ун-та. 2002. Вып. 9. 220 с.
16. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.

EXPERIENCE IN GEOSTRUCTURAL AND GEODYNAMIC INVESTIGATIONS OF NUCLEAR POWER PLANT ALLOCATION TERRITORIES FOR ASSESSING STABILITY OF ENGINEERING STRUCTURES

N. V. Makarova^{a,*}, V. M. Makeev^{b,##}, T. V. Sukhanova^a, and P. S. Miklyaev^b

^a Lomonosov Moscow State University,
Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^b Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia.

*E-mail: makarovanat@yandex.ru

##E-mail: vmakeev@mail.ru

The results of geological and structural-geodynamic research are presented for the territories of several nuclear power plants (NPP) located on the East European Platform. The influence of geological structure, lithology, and the latest tectonic movements are considered as well as the resultant structures and relief, which generally represent the geological environment, on the stability of the NPP areas. Structural and geodynamic conditions, in particular, recent tensile stresses that cause intense rock fracturing and high gas-fluid permeability, suffusion, karst and landslide, are proved to be the main causes of hazardous processes resulting in settling and tilting of some NPP buildings. Tectonic sloping of the sites towards descending depressions, the sand basement of NPP sites, sloping clay aquicludes, fluctuating water levels in the adjacent water reservoirs, the presence of so-called “hydrogeological windows”, the buried relief and modern structural and geodynamic conditions, i.e., tectonic stresses (tensile stresses in many cases) contribute to building deformations. Along with solving practical problems, a number of theoretical issues are considered. Lineaments are associated with rock fracture zones and faults zones; the fault zones in crystalline foundation influence the formation of recent structures; and new platform structures, i.e. gravity-tectonic massifs and pull-apart depressions, are distinguished.

Keywords: recent geodynamics, extension, tectonic stress sources, faults, sandy-clay deposits, buried relief, lineaments, fracture, pull-aparts, exogenous processes, suffusion

REFERENCES

1. Kopp, M.L. *Dugoobraznye struktury rastyazheniya v kinematike regional'nykh i global'nykh tektonicheskikh obstanovok* [Arcuate extension structures in the kinematics of regional and global tectonic settings]. *Geotectonika*, 2017, no. 5, pp. 18–36. (in Russian)
2. Makarov, V.I., Dorozhko, A.L., Makarova, N.V., Makeev, V.M. *Sovremennye geodinamicheski aktivnye zony platform* [Modern geodynamically active zones of platforms]. *Geoekologiya*, 2007, no. 2, pp. 99–110. (in Russian)
3. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Sukhanova, T.V., Dorozhko, A.L., Miklyaev, P.S., Korobova, I.V. *Noveishaya tektonika i geodinamika Nizhneokskogo regiona (Russkaya plita)* [Recent tectonics and geodynamics of the Nizhneoksky region (the Russian Plate)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 4. Geologiya*, 2012, no. 4, pp. 4–11. (in Russian)
4. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Sukhanova, T.V., Dorozhko, A.L., Korobova, I.V., Karfidova, E.A. *Noveishaya tektonika i geodinamika yugo-zapadnogo kryla Voronezhskoi anteklizy* [Recent tectonics and geodynamics of the southwestern flank of the Voronezh antecline]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 4. Geologiya*, 2015, no. 1, pp. 10–19. (in Russian)
5. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Dorozhko, A.L., Sukhanova, T.V., Korobova, I.V. *Geodinamicheskie sistemy i geodinamicheski aktivnye zony Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Geodynamic systems and geodynamically active zones of the East European Platform]. *Byul. MOIP. Otd. Geol.*, 2016, vol. 91, no. 4–5, pp. 9–26. (in Russian)
6. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Sukhanova, T.V., Gusevtsev, A.S. *Geologicheskie usloviya razvitiya suffuzionnykh protsessov i ikh sovremennaya aktivizatsiya na Sal'sko-Donskom podnyatii (rayon Rostovskoi AES)* [Geological conditions for the development of suffusion processes and their modern activation on the Salsko-Don uplift (the area of the Rostov NPP)]. *Geoekologiya*, 2019, no. 6, pp. 19–29. (in Russian)
7. Makeev, V.M. *Strukturno-geodinamicheskie usloviya uslozhivosti osobo opasnykh i tekhnicheskikh ob'ektov na drevnikh platformakh: avtoref. dis. dokt. geol.-min. nauk.* [Structural and geodynamic conditions for the stability of especially dangerous and technically complex objects on ancient platforms]. Extended Abstract Doctoral Sci. (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, I-Club Publ., 2015. 50 p. (in Russian)
8. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Sukhanova, T.V., Dorozhko, A.L., Korobova, I.V. *Strukturno-geomorfologicheskaya kharakteristika i chetvertichnye otlozheniya Ostrovetskogo raiona (Belarus')* [Structural-geomorphological characteristics and Quaternary deposits of the Ostrovets region (Belarus)]. Proc. VIII All-Russia Workshop on the study of Quaternary period. Rostov-on-Don, YuNTs RAN Publ., 2013, pp. 404–406. (in Russian)
9. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Sukhanova, T.V. *Strukturno-geomorfologicheskaya kharakteristika i chetvertichnye otlozheniya Ostrovetskogo raiona (Belarus')* [Structural-geomorphological characteristics and Quaternary deposits of the Ostrovets region (Belarus)]. Proc. VIII All-Russia Workshop on the study of Quaternary period. Rostov-on-Don, YuNTs RAN Publ., 2013, pp. 404–406. (in Russian)

- territorii razmeshcheniya Novovoronezhskoi AES-2* [Structural-geomorphological and geodynamic conditions of the Novovoronezh NPP-2 location territory]. Proc. XXII All-Russia Shchukin Sci. and Pract. Conference with international participation. Voronezh, VSU Publ., 2020, pp. 215–218. (in Russian)
10. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Sukhanova, T.V. *Sovremennaya geodinamika i neotektonika tsentral'noi chasti Russkoi ravniny* [Resent geodynamics and neotectonics of the central part of the Russian Plain]. Proc. LII Tectonic Workshop on Fundamental problems in tectonics and geodynamics. Moscow, GEOS Publ., 2020, vol. 2, pp. 67–72. (in Russian)
11. Marennyi, A.M., Tsapalov, A.A., Miklyaev, P.S., Petrova, T.B. *Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polya v geologicheskoi srede* [Patterns of the formation of radon field in the geological environment]. Moscow, Pero Publ., 2016, 394 p. (in Russian)
12. Miklyaev, P.S., Marennyi, A.M., Tsapalov, A.A., Petrova, T.B. *Kompleksnye monitoringovye issledovaniya radonovogo polya gruntovykh massivov. Osnovnyye rezultaty* [Complex monitoring studies of the radon field of soil massifs. Main results]. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, 2017, no. 4 (91), pp. 2–22. (in Russian)
13. *Noveishaya tektonika i geodinamika: oblast' sochleneniya Vostochno-Evropeiskoi platformy i Skifskoi plity* [The recent tectonics and geodynamics: the joint area between the East Europe Platform and the Scythian plate]. Yu.K. Shchukin, Ed., Moscow, Nauka Publ., 2006, 206 p. (in Russian)
14. Spungin, V.G., Burchik, V.A., Skvortsov, A.G. *Seismicheskie signaly v predelakh ploshchadki NV AES-2 i ikh svyaz' s osobennostyami stroeniya geologicheskoi sredy* [Seismic signals within the NV NPP-2 site and their connection with the structural features of the geological environment]. *Struktura, svoistva, dinamika i minerageniya litosfery Vostochno-Evropeiskoi platform* [Structure, properties, dynamics and minerageny of the lithosphere in the East European Platform]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2010, vol. 2, pp. 245–250. (in Russian)
15. Tregub, A.I. *Neotektonika territorii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Neotectonics of the Voronezh crystalline massif territory]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2002, issue 9, 220 p. (in Russian)
16. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian).

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.466.62

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОРЫ ОБОСНОВАНИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОРТОВЫМ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИМ СООРУЖЕНИЯМ

© 2023 г. И. Г. Кантаржи^{1,*}, А. В. Куприн^{1,**}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия

*E-mail: kantardgi@yandex.ru

**E-mail: rtyter55@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 11.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

По опубликованным данным из открытых источников проанализировано влияние морских волн и течений на портовые гидротехнические сооружения, рассмотрены характеристики размывов от волн, в том числе от волн цунами. Исследованы механизмы размыва от морских волн, связь между местным размывом и разжижением грунта. Исследовано их влияние на устойчивость морских гидротехнических сооружений. Проанализированы механизмы потери устойчивости гидротехническими сооружениями вследствие размыва волнами цунами. Приведен параметр усиления размыва от волн цунами, который представляет собой долю, на которую градиент порового давления уменьшает силы трения, сопротивляющиеся размыву. Такой подход позволяет учитывать явление разжижения грунта при оценке размывов, вызываемых волнами цунами.

Ключевые слова: волны цунами, местный размыв, разжижение грунта, морские гидротехнические сооружения, параметр усиления размыва

DOI: 10.31857/S0869780923010046, EDN: HSMQLA

ВВЕДЕНИЕ

На портовые гидротехнические сооружения действует большое количество разнообразных природных процессов, однако, морских инженеров интересуют в первую очередь два из них: морские волны и течения.

Морские волны и течения могут вызывать размыв дна у основания гидротехнических сооружений в период их эксплуатации. Размыв — это эрозия отложений вокруг основания сооружения, расположенного в проточной воде, например, в речной и прибрежной среде. Местный размыв дна, угрожающий общей устойчивости сооружений гравитационного типа, может возникать при действии штормовых волн и течений, струй от судовых движителей и волн цунами у гидротехнических сооружений (ГТС). Когда морское течение проходит вокруг оголовка волнолома, образуются водовороты, которые увеличивают скорость течения по его сторонам, вызывая эрозию отложений вниз по течению от его головы.

Один из самых малоизученных типов волн — сейсмические волны на воде или волны цунами. Цунами — одно из самых разрушительных природных явлений. Масштабы причиняемых ими бедствий и численность человеческих жертв не только страшны сами по себе, но подобные явле-

ния своей потенциальной опасностью создают постоянную тревогу у населения очень многих прибрежных регионов мира, особенно если в опасной зоне расположены другие угрожающие катастрофами объекты, как, например, АЭС. Сила самых разрушительных цунами настолько велика, что во многих авторитетных источниках информации утверждается невозможность эффективной защиты от них. Местные размывы от волн цунами угрожают целостности и устойчивости ГТС, запроектированных на цунамиопасных территориях, таких как Камчатский полуостров и Курильские острова. Проблема оценки параметров местного размыва не имеет строгого теоретического решения даже для простых случаев, и все известные работы базируются, в основном, на данных экспериментальных, главным образом лабораторных исследований и применении методов теории подобия и размерностей.

В связи с этим изучение механизма и установление параметров местных размывов у ГТС весьма актуально.

ВЛИЯНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ПОРТА

Цунами с высотой волны менее 2 м не приводит к серьезным бедствиям, но может нанести

ограниченный ущерб в прибрежной зоне. Однако, если высота волны превышает 4 м, она может причинить большой ущерб, включая разрушение сооружений и зданий. Если цунами превышает 8 м, оно становится разрушительным и может привести к гибели значительного количества людей [5]. Следует отметить, что воздействие цунами сильнее там, где больше высота волны, особенно в месте ее обрушения. Поэтому главные повреждения сооружений происходят именно в прибрежной зоне.

Основные повреждения порта могут быть разделены на следующие категории:

1. Ущерб, возникающий в результате обрыва швартовых, опрокидывания судов у причала.
2. Ущерб, возникающий в результате неконтролируемых движений маневрирующих или непришвартованных судов, переносимых потоками, вызванными цунами; повреждения при забрасывании судов из воды на причалы.
3. Частичное повреждение волнолома.
4. Размыв у дамб и волноломов.
5. Затопление и разрушение складов.
6. Унос потоком контейнеров и пиломатериалов.
7. Повреждение резервуаров и утечка масла, нефти и прочих химических веществ.
8. Разрушение жизненно важных коммуникаций.

Поведение цунами в порту зависит не только от ширины проранов между оградительными сооружениями, но и от площади акватории порта. Если акватория относительно небольшая, уровень воды в порту может быстро повыситься в результате вторжения цунами. С другой стороны, если порт имеет большую акваторию, при вторжении цунами повышение уровня моря будет меньше, что приведет к ограниченному затоплению.

Размывы, вызываемые волнами цунами

Причины разрушения сооружения, подверженного воздействию цунами, можно разделить на три группы: гидродинамические силы, огонь, распространяемый плавающими материалами; размыв и опрокидывание фундамента. Наличие сооружения приводит к изменениям схем течения в его окрестности, вызывая увеличение напряжения сдвига на морском дне и обеспечивая необходимую силу для увлечения частиц осадка с морского дна [10].

Хотя механизмы образования размыва под воздействием цунами кажутся схожими с механизмами размыва, вызванными штормовыми волнами, есть и некоторые различия. Штормовые волны имеют много циклов с периодом менее десятков секунд. Цунами, как правило, имеет один

или несколько циклов с периодом в минуты или десятки минут. Кроме того, типичное расстояние затопления цунами составляет несколько сотен метров, в некоторых случаях оно простирается более чем на километр, что намного больше, чем длина заплеска штормовой волны.

Также во время атаки цунами отличается процесс размыва. Цунами может длиться несколько минут или даже несколько часов. Продолжительность наката примерно равна продолжительности отката [6]. Между процессами наката и отката есть время, когда скорость практически равна нулю, обычно при максимальном затоплении. Другое различие между размывом цунами и размывом речным паводковым потоком заключается в скорости и числе Фруда¹. Волна при цунами протекает значительно быстрее, чем речной паводок. Разница в скорости и числе Фруда может создать различные схемы размыва и максимальную глубину ям размыва.

Выделяют четыре типа размывов от волн цунами.

Местный размыв — относительно глубокая яма размыва рядом с сооружением или под ним (рис. 1а). Термин “местный размыв” используется для обозначения потери материала в результате устойчивого сдвигового потока, направленного вокруг элемента сооружения [13]. Повышение порового давления может увеличить глубину локальных ям размыва.

Конкретнее под местным размывом понимается опускание слоя грунта в непосредственной близости от сооружения из-за локальных ускорений в придонной области и связанной с этим турбулентностью, приводящей к увеличению локальной способности переноса песка. Как только образовалась яма размыва, на ее краю будет происходить разделение потока, и будет развиваться слой смещения, увеличивая интенсивность турбулентности и стимулируя дальнейший размыв слоя (процесс самоусиления).

Размыв в результате перелива возникает в результате действия потока, который переливается через сооружение (волнолом или цунами-защитная дамба) и падает на грунт с сосредоточенным струйным воздействием (рис. 1б). Этот процесс похож на механизм перелива через водослив.

Размыв в результате сжатия потока возникает в месте, где широкий поток направляется в зону сжатия; такой размыв часто образуется рядом с преградой для потока.

Общий размыв — потеря грунта суши в зоне затопления, где высокая скорость потока и высокие

¹ Число Фруда или критерий Фруда, — один из безразмерных критериев подобия движения жидкостей и газов. Применяется в случаях, когда существенно воздействие внешних сил.

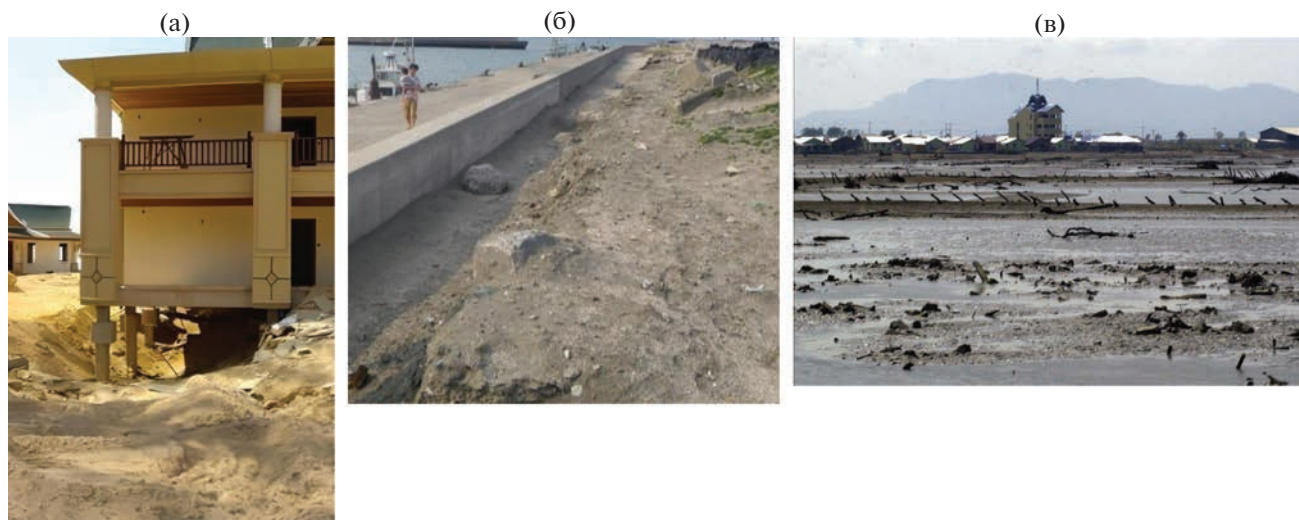


Рис. 1. Типы размывов от волн цунами: а — местный размыв (Ко Као Джомтьен, Пханган, Тайланд), б — размыв в результате перелива (порт Тайто, Япония), в — общий размыв.

напряжения сдвига при донном слое формируют широкие зоны эрозии (рис. 1в). Этот тип размыва может также усиливаться за счет повышения порового давления, что приводит к разжижению грунта [8].

Отсутствует достаточное количество данных измерений параметров общего размыва, необходимых для верификации методов расчета [2]. Как правило, общий размыв не повреждает сооружение, хотя он может способствовать разрушению его другими видами размыва в тех случаях, когда они накладываются друг на друга. Поэтому, в основном, существующие исследования фокусируются на анализе местных размывов.

Характеристики размыва и движения наносов количественно оцениваются путем наложения условий гипотетического, но типичного цунами. Модель цунами выбирается таким образом, чтобы параметры воздействия отражали реалистичные гидродинамические условия (например, скорость и глубина потока) типичного цунами [13]. К сожалению, лабораторные эксперименты не могут дать таких данных. Это связано с тем, что реальное цунами является очень протяженным (несколько сотен километров), распространяется на мелководье (на глубине нескольких километров от берега) с небольшой амплитудой (несколько метров). В результате возникает искажение в горизонтальной и вертикальной осях [5]. Следовательно, чтобы получить соответствующие данные, необходимо прибегать к численным или аналитическим моделям.

Анализ механизмов потери устойчивости гидротехническими сооружениями порта

Разрушение в результате размыва у основания с подветренной стороны — основной тип разру-

шения береговых дамб (рис. 2а). Отрыв защитного крепления обычно вызывается размывом основания. Бывали случаи, когда размыв основания не был обнаружен, но защитное крепление все равно выходило из строя. В некоторых случаях отрыв защитного крепления может быть обусловлен отрицательным давлением, вызванным быстрым переливом воды, который привел к всасыванию крепления и его удалению. Принято считать, что сдвиговые силы, вызванные быстрым течением у основания сооружения, создаваемым набегающими волнами, ответственны за размыв.

Отрыв верхнего крепления — один из наиболее распространенных типов разрушения прибрежных дамб. Основной причиной этого разрушения является отрицательное давление всасывания, вызванное быстрым потоком, переливающимся через сооружение [4]. Когда сила всасывания превышает силу сопротивления, удерживающего крепление на месте, защитное крепление отрывается, оставляя внутреннюю насыпь уязвимой для размыва. Как показано на рис. 2б, как только крепление прорвано, огромные гидродинамические силы часто приводят к полному разрушению сооружения.

Большинство парапетных стенок разрушаются в результате воздействия ударных сил волн. Как показано на рис. 2в, когда сила удара волн превышает прочность парапетной стенки, в сооружении появляются трещины, а в некоторых случаях она полностью разрушается. То же самое происходит и при опрокидывании таких сооружений, как дамбы и волноломы. Во многих случаях, когда сооружения разрушаются в результате опрокидывания, это происходит под действием ударной силы волн цунами, будь то при накате или при откате. Когда вызванный волнами опроки-

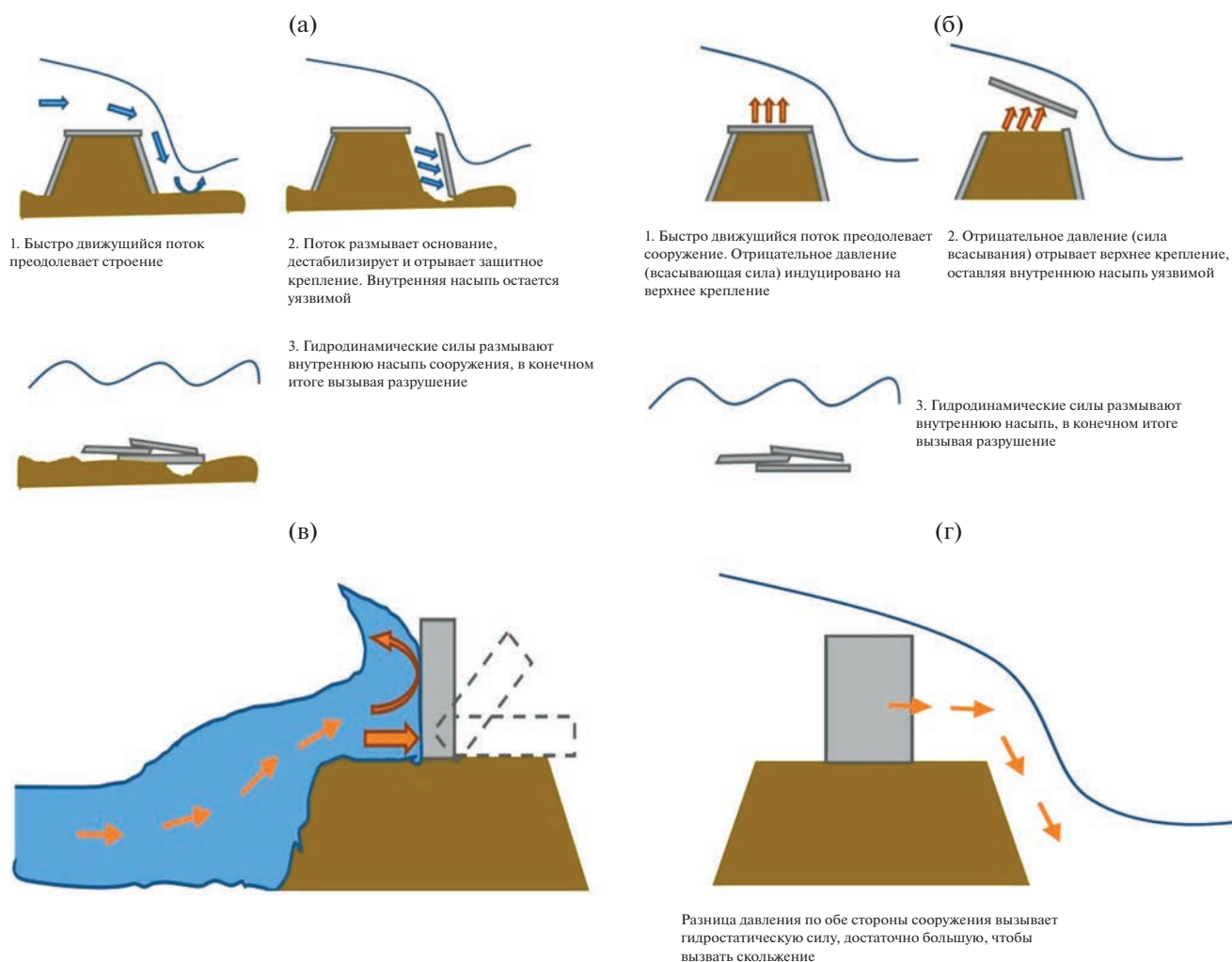


Рис. 2. Типы разрушения береговых дамб: а – размыв основания с подветренной стороны, б – отрыв верхнего крепления и разрушение, в – опрокидывание парапетной стенки, г – разрушение сооружения вследствие скольжения.

дывающий момент превышает восстанавливающий момент, сооружение опрокидывается [7]. Также гидростатические силы, обусловленные разницей уровней воды по обе стороны сооружения, часто приводят к разрушению при опрокидывании.

Скользящее разрушение – основной механизм разрушения волноломов. Когда волны цунами переливаются через сооружение, разница в уровне воды по обе стороны сооружения вызывает боковые гидростатические силы (рис. 2г). Эти силы толкают сооружение и во многих случаях приводят к его разрушению в результате скольжения.

Разжижение грунта

Усилению эффекта размыва может способствовать разжижение грунта. Разжижение грунта может произойти во время землетрясения, потому что при прохождении сейсмической волны ча-

стицы грунта начинают колебаться с разными скоростями, и часть контактов между ними разрывается, в результате чего грунт ведет себя не как твердое тело, а как плотная жидкость. Волновое разжижение морского дна создает риск для устойчивости морских сооружений.

Явление разжижения, вызванное морскими волнами, в последние годы привлекает все большее внимание при рассмотрении целостности прибрежных и морских сооружений. Разжижение грунта – процесс, вследствие которого грунт ведет себя не как твердое тело, а как плотная жидкость. Дифференциальная нагрузка на морское дно волной давления вызывает последовательность циклических сдвиговых напряжений в придонном слое грунта, и, если индуцированное напряжение сдвига превышает прочность грунта, может произойти значительная его деформация или разжижение, что окажет разрушительное

влияние на расположенные поблизости инженерные сооружения.

Условия цунами значительно осложняются переменной глубиной потока при затоплении, скоростью и продолжительностью генерируемых потоков, вызывающих высокие градиенты давления в грунте. Разжижение грунта морского дна сильно зависит от высоты и периода волн, причем глубина разжижения составляет примерно половину высоты волны.

Существуют две основные причины разжижения грунта: одна — это сдвигающая сила, создаваемая потоком на поверхности дна, а другая — это избыточное поровое давление в грунте, когда уровень воды падает [12]. С одной стороны, первая причина является важным фактором при анализе эрозии, вызванной крупномасштабными цунами с сильными течениями, и учитывается во многих исследованиях цунами. С другой стороны, существует незначительное количество исследований второй причины, посвященных феномену цунами, потому что размыв, вызванный цунами, чрезвычайно сильный, и при таких условиях оценить собственно его вклад в разжижение сложно.

Параметр усиления размыва от волн цунами

Как правило, существует два механизма разжижения: мгновенное разжижение и остаточное разжижение [11]. Мгновенное разжижение может происходить только в очень плотном песке. Его влияние на устойчивость морских сооружений незначительно. Однако мгновенное разжижение может усилить размыв донных отложений вокруг сооружений. Остаточное разжижение происходит из-за повышения порового давления в рыхлом грунте при циклическом нагружении. В большинстве случаев остаточное разжижение грунтов в основании сооружений оказывает критическое влияние на их устойчивость.

Грунт разжижается без эффективного напряжения между зернами грунта, если вертикальный градиент порового давления p превышает удельный вес грунта в сухом состоянии γ_b :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=z_0} > -\Lambda(\rho_{sat} - \rho) \times g = -\Lambda\gamma_b, \quad (1)$$

где ρ_{sat} — плотность грунта в водонасыщенном состоянии, ρ — плотность воды, Λ — параметр усиления размыва, введенный С. Тонкин (Tonkin) [9], z_0 — отметка подвижного слоя наносов.

Если наносы разжижаются, то силы сопротивления отсутствуют, и они легко размываются. Параметр усиления размыва, Λ , представляет собой долю, на которую градиент порового давления уменьшает силы трения, сопротивляющиеся размыву. Величина Λ эквивалентна коэффициенту

порового давления, т.е. отношению избыточного порового давления к начальному эффективному напряжению; $\Lambda = 1$ соответствует нулевому эффективному напряжению. Для любых заданных характеристик потока (скорость, глубина, турбулентность, другие) существует некоторое значение Λ , для которого остаточные силы трения достаточно малы, чтобы размыв происходил очень быстро [1]. Это пороговое значение Λ должно находиться в диапазоне от 0 до 1. Основываясь на лабораторных экспериментах по размыву грунта у вертикального цилиндра, было установлено, что значительная нестабильность грунта возникает, когда Λ превышает значение в 0.5 ($\Lambda \geq 0.5$).

Комбинирование аналитического решения с условием устойчивости грунта дает количественный прогноз глубины подвижного грунта d_s , вызванного цунами:

$$d_s = \frac{\Delta p}{\gamma_b \Lambda} \left(1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \left[\frac{d_s}{2\sqrt{c_v \Delta T}} \right] \right), \quad (2)$$

где $i^2 \operatorname{erfc} [\cdot]$ — второй интеграл дополнительной функции ошибок. Глубина размыва d_s неявно входит в (2). Ограничивающее условие, когда $d_s \rightarrow 0$, дает меру того, может ли возникнуть какая-либо нестабильность грунта из-за градиента порового давления:

$$\Lambda(0) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Delta p}{\gamma_b \sqrt{c_v \Delta T}} \quad (3)$$

Критическое значение $\Lambda \approx 0.5$, меньшее 1.0 (условие нулевого эффективного напряжения), связано с касательными напряжениями и турбулентностью, создаваемыми потоком и трехмерными эффектами (т.е. горизонтальными градиентами порового давления, возникающими вокруг цилиндра в экспериментах).

В экспериментах [3] было установлено, что во время обратного потока цунами уровень воды упал, что привело к разжижению в теле насыпи, и разжижение произошло на глубине 28% от максимальной глубины размыва вследствие сдвиговых сил. Явление разжижения может возникнуть из-за резкого падения уровня воды в области концентрации возвратного потока. Следовательно, необходимо учитывать явление разжижения при анализе устойчивости и размыва вокруг сооружений.

ВЫВОДЫ

Наибольший ущерб сооружениям при воздействии волн цунами наносит локальный размыв, на котором, в основном, фокусируются исследования соответствующих размывов. Определение характеристик размыва имеет большое значение для морской гидротехники при проектировании

гидротехнических сооружений на цунамиопасных территориях.

Основной механизм разрушения прибрежных дамб и стенок — размыв с подветренной стороны. Для волноломов основным механизмом разрушения является скользящее разрушение.

Усилению эффекта размыва может способствовать разжижение грунта. Основными причинами разжижения грунта являются: сдвигающая сила, создаваемая потоком на поверхности дна, и избыточное поровое давление в грунте, когда уровень воды падает.

Значительная нестабильность грунта возникает, когда параметр усиления размыва Λ превышает значение 0.5 ($\Lambda \geq 0.5$). Параметр Λ может использоваться для оценки областей, где мгновенное разжижение может быть ответственно за размыв и движение наносов, и для пересчета глубин размыва, полученных без учета разжижения.

Разжижение от волн цунами может проникать в слой грунта толщиной до 28% от максимальной глубины размыва. Явление разжижения может возникнуть из-за резкого падения уровня воды в зоне сосредоточения возвратного стока. Следовательно, явление разжижения необходимо учитывать при анализе размыва вокруг сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприн А.В., Кантаржи И.Г. Влияние разжижения грунта на глубину размыва, вызываемого волнами цунами // Гидротехническое строительство. 2022. № 5. С. 8–12.
2. Куприн А.В., Кантаржи И.Г. Типы размывов от волн цунами, воздействующих на гидротехнические сооружения // Гидротехника, 2020. № 4 (61). С. 48–50.
3. Iida T., Kure S., Udo K., Mano A., Tanaka H. Scouring mechanism around structure by return flow of tsunami considering liquefaction // Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2 (Coastal Engineering). 2015. V. 71 (2). P. 241–246. https://doi.org/10.2208/kaigan.71.I_241
4. Kato F., Suwa Y., Watanabe K., Hatogai S. Mechanisms of coastal dike failure induced by the reat East Japan Earthquake tsunami // Proc. 33rd Int. Conf. Coastal Engineering, 2012 Santander, Spain. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.structures.40>
5. Kuprin A.V., Novakov A.D., Kantarzhi I.G., Gubina N.A. Local and General Scours Caused by Tsunami Waves // Power Technology and Engineering. 2021. V. 54. No 6. P. 836–840. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01296-1>
6. Kuswandi K., Triatmadja R., Istiarto I. Simulation of scouring around a vertical cylinder due to tsunami // Science of Tsunami Hazards. 2017. V. 36 (2). P. 59–69.
7. Lim G., Premaratne B., Jayaratne R., Marriott M., Shibayama T. Comparison of Failure Mechanisms of Coastal Structures due to the 2004 Indian Ocean and 2011 Tohoku Tsunami Events // Proc. 6th Int. Conf. on Structural Engineering and Construction Management, 2015.
8. Tonkin S., Francis M., Bricker J. Limits on Coastal Scour Depths due to Tsunami // Proc. 6th China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering. 2013. P. 671–678. <https://doi.org/10.1061/9780784413234.086>
9. Tonkin S., Yeh H., Kato F., Sato S. Tsunami scour around a cylinder: an effective stress approach // Journal of Fluid Mechanics. 2003. V. 496. P. 165–192. <https://doi.org/10.1017/S0022112003006402>
10. Van Der Tempel J., Zaaijer M.B., Subroto H. The effects of scour on the design of offshore wind turbines // Proc. 3rd Int. Conf. on Marine Renewable Energy. 2004. London UK. P. 27–35.
11. Yang G., Jianhong Y. Nonlinear standing wave-induced liquefaction in loosely deposited seabed // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. V. 77. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1038-z>
12. Yeh H. Tsunami Inundation Scour of Roadways, Bridges and Foundations Observations and Technical Guidance from the Great Sumatra Andaman Tsunami // Professional Fellowship Report. 2006.
13. Yeh H., Li W. Tsunami Scour and Sedimentation // Proc. 4th Int. Conf. on Scour and Erosion. 2008, Tokyo, JP, P. 95–106.

NATURAL PROCESSES AS JUSTIFICATION FACTORS FOR DECISIONS ON PORT HYDRAULIC STRUCTURES

I. G. Kantarzhi^{a, #} and A. V. Kuprin^{a, ##}

^a Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia

[#]E-mail: kantardgi@yandex.ru

^{##}E-mail: rtyter55@gmail.com

The effects of sea waves and currents on harbour hydraulic structures are analysed from published open source data and the characteristics of scour from waves, including tsunami waves, are considered. Local bottom scour threatening the general stability of gravity-type engineering structures can arise under the effect of storm waves and currents, jets from ship propulsion devices and tsunami waves near hydraulic engineering structures. The types of scour mechanisms from sea waves have been investigated, i.e., local, general, and

overtopping scour. There is a lack of sufficient measurement data for general scour to verify the calculation methods. Generally, general scour does not damage a structure, although it can contribute to its destruction by other types of scour when they overlap. Therefore, existing studies mainly focus on the analysis of local scour. The relationship between local scour and ground liquefaction and their influence on the stability of marine hydraulic structures is established. Failure mechanisms of hydraulic structures due to erosion by tsunami waves are analyzed: leeward and seaward toe scour, crown armour failure, parapet wall failure, sliding failure. The tsunami wave scour enhancement parameter is given, which is the fraction by which the pore pressure gradient reduces the frictional forces resisting scour. Significant ground instability occurs when the scour amplification parameter Λ exceeds a value of 0.5 ($\Lambda \geq 0.5$). The parameter Λ can be used to assess areas where instantaneous liquefaction may be responsible for scour and sediment movement and to further recalculate erosion depths obtained without considering liquefaction. Liquefaction from a tsunami wave may penetrate up to 28% of the maximum erosion depth due to shear forces. The liquefaction phenomenon may occur due to a sudden drop in the water level in the area of return flow concentration. Consequently, the liquefaction phenomenon must be considered in the stability and erosion analysis around the structure.

Keywords: tsunami waves, local scour, liquefaction, offshore hydraulic structures, erosion amplification parameter

REFERENCES

1. Kuprin, A.V., Kantarzhi, I.G. *Vliyanie razzhizheniya grunta na glubinu razmyva, vyzvaemogo volnami tsunami* [Influence of ground liquefaction on the washout depth caused by tsunami waves]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2022, no 5. pp. 8–12. (in Russian)
2. Kuprin, A.V., Kantarzhi, I.G. *Tipy razmyvov ot voln tsunami, vozdeistvuyushchikh na gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Types of scour from tsunami waves affecting hydraulic structures]. *Gidrotekhnika*, 2020, no 4 (61), pp. 48–50. (in Russian)
3. Iida, T., Kure, S., Udo, K., Mano, A., Tanaka, H. Scouring mechanism around structure by return flow of tsunami considering liquefaction. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Series B2 (Coastal Engineering)*, 2015, vol. 71, pp. 241–246.
4. Kato, F., Suwa, Y., Watanabe, K., Hatogai, S. Mechanisms of coastal dike failure induced by the great East Japan Earthquake tsunami // Proc. 33rd Int. Conf. Coastal Engineering, 2012, Santander, Spain.
5. Kuprin, A.V., Novakov, A.D., Kantarzhi, I.G., Gubina, N.A. Local and general scours caused by tsunami waves. *Power Technology and Engineering*, 2021, vol. 54, no 6, pp. 836–840.
6. Kuswandi, K., Triatmadja, R., Istiarto, I. Simulation of scouring around a vertical cylinder due to tsunami. *Science of tsunami hazards*, 2017, vol. 36 (2), pp. 59–69.
7. Lim, G., Premaratne, B., Jayaratne, R., Marriott, M., Shibayama, T. Comparison of failure mechanisms of coastal structures due to the 2004 Indian Ocean and 2011 Tohoku tsunami events // Proc. 6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, 2015.
8. Tonkin, S., Francis, M., Bricker, J. Limits on coastal scour depths due to tsunami // Proc. Sixth China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, 2013, pp. 671–678.
9. Tonkin, S., Yeh, H., Kato, F., Sato, S. Tsunami scour around a cylinder: an effective stress approach. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, vol. 496, pp. 165–192.
10. Van Der Tempel, J., Zaaijer, M.B., and Subroto, H. The effects of scour on the design of offshore wind turbines // Proc. 3rd Int. Conf. on Marine Renewable Energy, 2004, London, UK, pp. 27–35.
11. Yang, G., Jianhong, Y. Nonlinear standing wave-induced liquefaction in loosely deposited seabed. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, vol. 77, pp. 1–19.
12. Yeh, H. Tsunami inundation scour of roadways, bridges and foundations observations and technical guidance from the Great Sumatra Andaman tsunami. Professional Fellowship Report, 2006.
13. Yeh, H., Li, W. Tsunami scour and sedimentation. // Proc. 4th Intl. Conf. on Scour and Erosion, 2008, Tokyo, JP, pp. 95–106.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.448:624.131

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТРЕХ СПОСОБОВ РАСЧЕТА ДИАМЕТРА КАРСТОВО-ОБВАЛЬНОГО ПРОВАЛА “ПРОСТОГО” ТИПА

© 2023 г. В. П. Хоменко^{1,*}, М. В. Леоненко^{2,**}, А. О. Дзущев^{3,***}

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия

² ООО “Дзержинская карстовая лаборатория”,
пр. Циолковского, 4а, к. 19, Дзержинск, Нижегородская обл., 606025 Россия

³ ООО “Аврора СК”,
ул. Лужники, 24, стр. 22, оф. 114, Москва, 119048 Россия

*E-mail: oms@mgsu.ru

**E-mail: mail@prokarst.ru

***E-mail: avrorask@inbox.ru

Поступила в редакцию 18.11.2022 г.

После доработки 18.11.2022 г.

Принята к публикации 29.11.2022 г.

Рассматривается возможность прогнозирования размеров карстовых провалов, возникающих на территориях, где растворимые породы перекрыты глинистыми породами. Процесс формирования этих провалов включает в себя только обрушение глинистых пород, и по этой причине такого рода поверхностные карстовые проявления целесообразно именовать карстово-обвальными провалами “простого” типа. Их появление на земной поверхности или под подошвами фундаментов чаще всего бывает вызвано растворением карстующихся пород, однако роль триггера могут сыграть и другие факторы природного или техногенного характера (например, снижение пьезометрического напора карстовых вод), что случается гораздо реже. На застроенных территориях эта разновидность карстового провалообразования может привести к деформированию и даже разрушению зданий и сооружений. Изучение данного феномена в полевых условиях и на лабораторных физических моделях показало, что карстово-обвальные провалы “простого” типа представляют собой результат последовательного обрушения глинистых пород, которое на первой стадии может принять вид их внутреннего вывала. Рассмотрены три способа прогнозирования диаметров таких провалов, отличающиеся друг от друга в теоретических предпосылках, но использующие одинаковые исходные параметры для прогностических расчетов. Осуществлена сравнительная верификационная оценка решений, полученных этими способами применительно к общему объекту.

Ключевые слова: карст, глинистые породы, обрушение, провал, прогноз

DOI: 10.31857/S086978092301006X, **EDN:** HSNGBW

ВВЕДЕНИЕ

В конце прошлого века, благодаря И.А. Саваренскому и Н.А. Миронову [8], в отечественную методическую (а затем и в нормативную) литературу прочно вошел термин “карстово-обвальные провалы”. Так стали называть провалы, возникающие при обрушении кровли полости, сформировавшейся в растворимых (карстующихся) породах. Впоследствии один из авторов упомянутой статьи выделил генетическую разновидность карстово-обвальных провалов, приуроченную к территориям, где растворимые породы перекрыты от их кровли до земной поверхности слабопроницаемыми глинистыми породами. Подобные провалы было предложено именовать карстово-обвальными провалами “простого” типа [11]. Название

было мотивировано тем, что механизм этой разновидности карстового провалообразования не осложнен гидродинамическими разрушениями несвязных водонасыщенных дисперсных пород, что характерно для карстово-обвального провалообразования “сложного” типа [12].

В англоязычных публикациях для наименования карстово-обвальных провалов “простого” типа чаще всего применяют термины “dropout sinkholes” [17] или “cover collapse sinkholes” [15]. Геологические условия, в которых проявляется эта генетическая разновидность карстового провалообразования, характерны для разных регионов планеты, а сам этот феномен представляет серьезную опасность для строительства и для окружающей среды. Наша страна не является ис-



Рис. 1. Скопление карстовых воронок, сформировавшееся в результате длительного и интенсивного карстово-обвального провалообразования “простого” типа (Павловский район Нижегородской области, 2007 г.). Фото В.П. Хоменко.

ключением. В частности, в некоторых карстовых районах Республики Башкортостан регулярное появление провалов такого типа наносит значительный ущерб хозяйственным объектам различного назначения [1]. Иногда многочисленные, близко расположенные (и даже примыкающие друг к другу) старые карстовые воронки, образовавшиеся в результате выполаживания бортов карстово-обвальных провалов “простого” типа, формируют специфические ландшафты с контрастным рельефом, что можно видеть на рис. 1. Естественно, строительное освоение таких территорий требует значительных затрат.

ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЕ, ВЫЗВАННОЕ ОБРУШЕНИЕМ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД В КАРСТОВУЮ ПОЛОСТЬ

Известны три основные причины обрушения глинистых пород в нижележащую карстовую полость: 1) расширение карстовой полости на контакте с подошвой глинистых пород за счет растворения ее стенок; 2) динамические воздействия на глинистые породы; 3) падение пьезометрического напора карстовых вод, т.е. снижение направленного вверх поддерживающего гидростатического давления на подошву глинистого водопора. Первый фактор, как правило, является результатом естественного протекания карстового процесса. Второй фактор может иметь как природное (землетрясения), так и техногенное (работа определенных механизмов, движение транспорта и др.) происхождение. Третий фактор преимущественно является результатом искусственного отбора карстовых вод для различных целей [16]. Рассмотрим два примера, иллюстрирующих действие первого и третьего факторов.

Первым примером служит участок, расположенный на территории Павловского района Нижегородской обл. вблизи деревень Коровино и

Кишемское. Здесь уже несколько тысячелетий продолжается массовое формирование карстовых провалов, вызванное естественным растворением нижнепермских сульфатных и верхнепермских карбонатных пород [3]. Выше карстующихся пород залегают верхнепермские глины с прослоями алевролитов и мергелей, перекрытые вплоть до земной поверхности четвертичными суглинками. Суммарная мощность глинистой толщи составляет первые десятки метров, а карстовые воды обладают пьезометрическим напором, достигающим 18 м. Диаметры свежих провальных форм доходят до 16 м, а диаметры старых воронок достигают десятков метров (см. рис. 1). В пределах участка и на окружающих его территориях каких-либо значительных техногенных воздействий на геологическую среду не наблюдается.

В качестве второго примера можно привести ситуацию, сложившуюся в середине прошлого века в штате Пенсильвания (США), в окрестностях населенного пункта Херши, где находится известная шоколадная фабрика [14]. Недалеко от нее уже многие годы осуществлялась сначала открытая, а затем подземная добыча ордовикских известняков. В мае 1949 г. почти двукратно усилился шахтный водоотлив, в результате чего образовалась депрессионная воронка площадью около 30 км², в центре которой уровень подземных вод был снижен на 75 м. В пределах этой воронки, где снижение уровня грунтовых вод превысило 15 м, на территории площадью около 7 км² за 5 мес образовалось более 100 провалов поперечником от 2 до 7 м и глубиной до 8 м. Известняки здесь содержат многочисленные полости и перекрыты до земной поверхности глинистым элювием средней мощностью 20 м, который начал обрушиваться в полости в результате падения поддерживающего эти породы вертикального гидростатического давления. До 1949 г. в этой



Рис. 2. Свежий карстово-обвальный провал “простого” типа, образовавшийся в результате обрушения глинистых пород в Кунгурскую ледяную пещеру (окраина г. Кунгура Пермского края, 2004 г.). Фото В.П. Хоменко.

местности практически горизонтальная пьезометрическая поверхность карстовых вод занимала стабильное положение на глубине около 8 м. Карстовые провалы появлялись, но крайне редко, поскольку это было связано с очень медленным растворением известняков при существовавшем до этого времени гидродинамическом режиме подземных вод. После того, как в декабре 1949 г. район добычи известняков был ограничен цементной завесой, и одновременно с этим началась искусственная подпитка подземных вод за ее пределами, провалообразование, зона которого уже подступала к зданиям фабрики, прекратилось.

В подавляющем большинстве случаев свежие карстовые провалы, которые образуются в результате сквозного обрушения глинистых пород, выходящего на земную поверхность, имеют конфигурацию, близкую к цилиндрической (рис. 2). Это означает, что данная форма рельефа представляет собой результат обрушения монолитного грунтового блока в виде вертикального круглого цилиндра, и при этом глинистые породы испытывают срез по его боковой поверхности. Теоретическое обоснование этого феномена было дано Г.П. Постоевым [5], причем не только в отношении глинистых пород.

Иногда свежие карстово-обвальные провалы “простого” типа имеют куполообразную форму. Обычно провалы такой конфигурации приурочены к участкам неглубокого залегания растворимых пород, поэтому они легко воспроизводятся на лабораторных физических моделях [10] и выглядят в вертикальном разрезе так, как показано на рис. 3. В натуральных условиях куполообразные карстово-обвальные провалы “простого” типа обнаруживаются довольно редко, потому что нависающие грунтовые “консоли” очень быстро

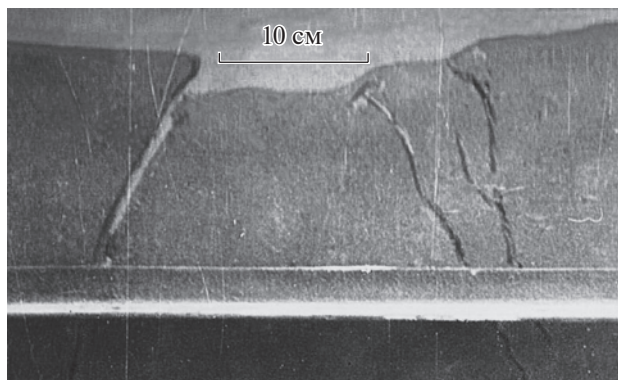


Рис. 3. Куполообразный провал, образовавшийся в теле “плоской” модели из эквивалентных материалов (масштаб 1: 16) в ходе экспериментального изучения обрушения глин в расширяющуюся полость. Материал, имитировавший глины, представлял собой смесь сухого пылеватого песка и порошкообразного бентонита с трансформаторным маслом.

обваливаются под действием собственного веса, что, в общем-то, можно видеть и в правой части рис. 3.

При достаточно большой глубине залегания кровли растворимых пород обрушение глинистых пород в карстовые полости может происходить и без выхода на земную поверхность, и тогда оно принимает вид так называемого внутреннего вывала. В этом случае выше полости, сформировавшейся в растворимых породах, над которой произошло обрушение перекрывающих ее глинистых пород, возникает новая (вторичная) полость. Она ограничена сверху куполообразным сводом, по поверхности которого происходит разрыв и сдвиг глинистых пород при выпадении монолитного грунтового блока. На рис. 4 показана вторичная карстовая полость обрушения шириной около 1.5 м, вскрывшаяся в борту небольшого карьера приблизительно на глубине 5 м от земной поверхности, на которой это обрушение никак не проявилось.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

В настоящее время известны два концептуальных подхода к прогностическому расчету диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа на детерминистической основе. Оба они базируются на принципе оценки предельного состояния глинистых пород в момент их обрушения в полость при равенстве сил, вызывающих этот процесс (вес горной породы), и сил, ему противостоящих (сопротивление горной породы сдвигу и разрыву, а также поддерживающее гидростатическое давление). В основе обоих подхо-



Рис. 4. Вторичная полость, образовавшаяся в результате обрушения пермских глин в первичную полость, находящуюся в нижележащих пермских гипсах (окрестности г. Павлово Нижегородской области, 2013 г.). Кадр видеосъемки, выполненной М.В. Леоненко.

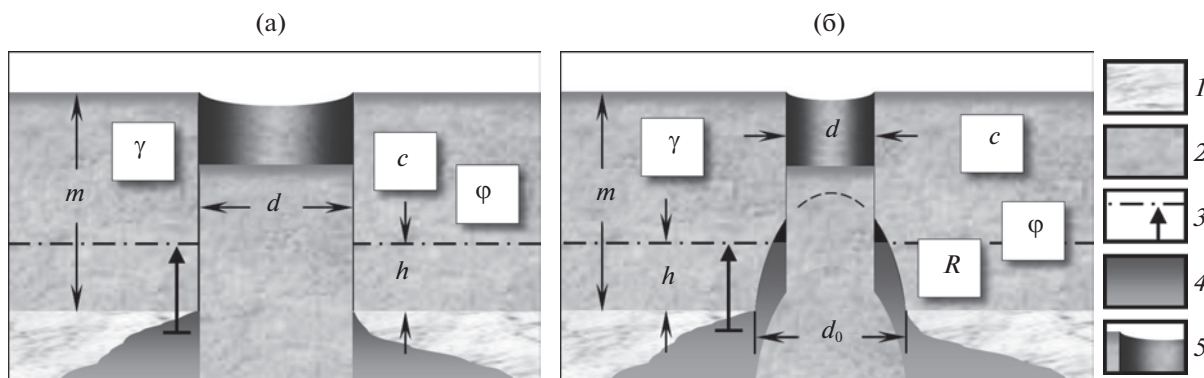


Рис. 5. Схемы, иллюстрирующие концептуальные подходы к прогностическому расчету диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа: а – подход, опирающийся исключительно на геомеханическую модель А. Бирбаумера; б – подход, опирающийся на геомеханические модели А. Бирбаумера и М.М. Протодяконова. Буквенные обозначения расшифрованы в тексте. 1 – растворимые породы; 2 – глинистые породы; 3 – пьезометрический уровень карстовых вод; 4 – полость, заполненная водой; 5 – провал.

дов лежат теоретические разработки, предложенные еще в начале прошлого века в области горного дела, разумеется, модернизированные и адаптированные к решению задач инженерного карстоведения.

Первый концептуальный подход исходит из предположения, что свежий карстово-обвальный провал “простого” типа формируется одновременно за счет нисходящего сдвига в карстовую полость монолитного блока глинистых пород в виде вертикального круглого цилиндра, имеющего высоту, равную глубине залегания кровли растворимых пород (рис. 5а). Простейшую геомеханическую модель, пригодную для формального описания этого процесса, предложил в 1913 г. немецкий исследователь А. Бирбаумер (A. Bierbauer) [13].

Второй концептуальный подход опирается на идею, что карстово-обвальное провалообразова-

ние “простого” типа может включать в себя в качестве первой стадии обрушение глинистых пород в виде их внутреннего вывала, ограниченного обращенным вершиной вверх параболоидом вращения. На следующей стадии в образовавшуюся таким образом вторичную полость происходит нисходящий сдвиг монолитного цилиндрического блока вышележащих глинистых пород, но его высота уже будет равна расстоянию по вертикали от земной поверхности до верхней точки вторичной полости (рис. 5б). В этом случае, кроме модели А. Бирбаумера, в расчет принимается еще и разработанная в 1912 г. геомеханическая модель М.М. Протодяконова [6], на которую можно опираться при математическом описании процесса формирования внутреннего вывала.

Существует довольно много методов прогностического расчета диаметров карстовых провалов рассматриваемого генетического типа, реали-

зующих оба рассмотренных выше подхода [2]. В качестве трех наиболее характерных и принципиально различающихся между собой альтернативных теоретических решений, разработанных отечественными специалистами, предлагается сравнить между собой расчетные методы, авторами которых являются Г.М. Троицкий, В.В. Савин и В.П. Хоменко. Поскольку во всех трех способах в качестве исходных параметров для прогностических расчетов используются одинаковые величины, результаты соответствующих прогнозов могут быть корректно сопоставлены.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТРЕХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СПОСОБОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Способ Г.М. Троицкого является единственным решением, пригодным для прогностического расчета диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа, которое условно можно считать нормативным, поскольку оно рекомендовано к применению методическим документом [7]. В основе способа лежит геомеханическая модель А. Бирбаумера (см. рис. 5а). Согласно теоретическому решению Г.М. Троицкого, функциональная зависимость диаметра провала от глубины залегания кровли растворимых пород имеет линейный характер. Само это решение в упрощенном виде (для однородной глинистой толщи и без учета давления под подошвой фундамента) выражается формулой:

$$d = 2m\xi \tan \varphi + 4c/\gamma, \quad (1)$$

где d — диаметр провала; m — глубина залегания кровли растворимых пород, м; ξ — коэффициент бокового давления глинистых пород; φ — их угол внутреннего трения, градус; c — их удельное сцепление, кПа; γ — их удельный вес, кН/м³.

При этом величина ξ рассчитывается по формуле:

$$\xi = 1 - \sin \varphi. \quad (2)$$

Способ В.В. Савина [9], также как и способ Г.М. Троицкого, применим для прогностического расчета диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа и тоже базируется на геомеханической модели А. Бирбаумера (см. рис. 5а). Вместе с тем, в отличие от предыдущего, это теоретическое решение математически выражает нелинейную функциональную зависимость диаметра провала от глубины залегания кровли растворимых пород, которая имеет следующий вид:

$$d = 4m\xi \tan \varphi / \ln(1 + \gamma m\xi \tan \varphi / c). \quad (3)$$

Кроме того, величина ξ , присутствующая в формуле (3), рассчитывается по-другому:

$$\xi = \tan^2(45^\circ - \varphi/2). \quad (4)$$

Способ В.П. Хоменко [12], в отличие от двух предыдущих, не просто пригоден, а специально разработан для расчета диаметров карстово-обвальных провалов “простого” типа и представляет собой теоретическое решение, объединяющее геомеханические модели А. Бирбаумера и М.М. Протодяконова (см. рис. 5б). Также как и способ В.В. Савина, способ В.П. Хоменко предлагает нелинейную интерпретацию функциональной зависимости диаметра провала от глубины залегания кровли растворимых пород, а величина ξ в обоих случаях рассчитывается по формуле (4). Согласно решению В.П. Хоменко, соответствующие прогностические расчеты осуществляются по следующим формулам:

$$d = 2\xi(m - d_0/2f) \tan \varphi + 4c/\gamma, \quad (5)$$

$$d_0 = 4f(\gamma_w h + R)/\gamma + 16c/3\gamma, \quad (6)$$

$$f = \tan \varphi + c/\gamma m, \quad (7)$$

где d_0 — критическая ширина карстовой полости на контакте с перекрывающими ее глинистыми породами, обеспечивающая их внутренний вывал, м; f — коэффициент крепости глинистых пород по М.М. Протодякову; γ_w — удельный вес воды, принимаемый равным 10 кН/м³; h — пьезометрический напор карстовых вод, м; R — сопротивление глинистых пород разрыву, кПа.

Согласно теоретическому решению В.П. Хоменко, карстово-обвальное провалообразование “простого” типа становится невозможным, если $d > d_0$: в этом случае обрушение глинистых пород ограничивается их внутренним вывалом. При выполнении неравенства $d_0 > 2fm$ вывала не будет, и обрушение сразу выйдет на поверхность, а внутреннее пространство провала будет иметь куполообразную форму (см. рис. 3).

Существуют серьезные расхождения в результатах прогностических расчетов, осуществляемых с использованием трех перечисленных выше способов. Эти расхождения проявляются тем сильнее, чем выше прочность глинистых пород, испытывающих обрушение, и чем больше глубина залегания растворимых пород (рис. 6). В связи с этим возникает необходимость сравнить результаты соответствующих расчетов с реальными диаметрами карстово-обвальных провалов “простого” типа при наличии возможности их корректного сравнения.

Такая возможность представилась после того, как в 2018 г. вблизи села Неледино Шатковского района Нижегородской области образовался карстово-обвальный провал “простого” типа, и были проведены необходимые исследования и измерения [4]. Первоначальный диаметр провала (d_p) был равен 16 м (рис. 7), и он имел форму, близкую к вертикально-круглоцилиндрической. На участке провала кровля растворимых пород (верхне-

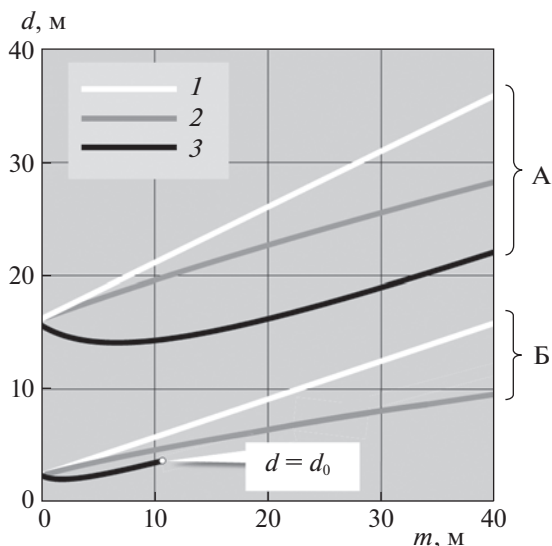


Рис. 6. Графически выраженные зависимости прогнозируемого диаметра карстово-обвального провала “простого” типа (d) от глубины залегания кровли растворимых пород (m), рассчитанного способами Г.М. Троицкого (1), В.В. Савина (2) и В.П. Хоменко (3): А — для прочных глин ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 21^\circ$; $c = 81 \text{ кПа}$; $R = 16 \text{ кПа}$); Б — для слабых суглинков ($\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 12^\circ$; $c = 12 \text{ кПа}$; $R = 2 \text{ кПа}$).

пермских известняков) находится на глубине (m), равной 30 м. Они перекрыты верхнепермскими и четвертичными глинистыми породами, причем мощность четвертичных пород (по визуальной оценке) составляет приблизительно 1/5 от общей мощности толщи глинистых пород. Карстовые воды на участке провала безнапорные ($h = 0$).

Что касается физико-механических свойств глинистых пород, то в качестве исходных данных были приняты величины, полученные обратными расчетами для глинистых пород той же стратиграфической единицы (татарского яруса верхней

перми) на участке карстово-обвального провала “простого” типа, образовавшегося в 1959 г. у деревни Пивоварово Вязниковского района Владимирской области [11]: $\gamma = 21 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 23^\circ$; $c = 77 \text{ кПа}$; $R = 32 \text{ кПа}$. Результаты промежуточных и окончательных прогностических расчетов, а также сравнительной верификационной оценки трех рассматриваемых методов представлены в табл. 1.

ВЫВОДЫ

1. Основным содержанием процесса формирования карстово-обвального провала “простого” типа является обрушение глинистых пород в карстовую полость. Провалы этой генетической разновидности появляются там, где растворимые породы перекрыты глинистыми породами вплоть до земной поверхности. Карстово-обвальное провалообразование “простого” типа может быть инициировано техногенными факторами (например, искусственным отбором карстовых вод) и представляет серьезную опасность для зданий и сооружений.

2. Существуют два подхода к прогнозированию диаметра карстово-обвального провала “простого” типа на расчетно-теоретической основе. Один подход допускает, что в расчет достаточно принимать только нисходящий сдвиг в карстовую полость круглого вертикального грунтового цилиндра, высота которого равна мощности глинистых пород, перекрывающих растворимые породы. Другой подход исходит из предпосылки, что этому процессу должен предшествовать внутренний вывал глинистых пород, ограниченный обращенным вершиной вверх параболоидом вращения. Оба эти подхода базируются на теоретических разработках в области горного дела, предложенных еще в начале



Рис. 7. Карстово-обвальный провал “простого” типа, выбранный в качестве объекта для сравнительной верификационной оценки трех способов прогностического расчета диаметров провалов (Шатковский район Нижегородской области, 2019 г.). Фото В.П. Хоменко. Штриховой линией показан приблизительный контур провала в момент его образования в 2018 г.

Таблица 1. Результаты сравнительной верификационной оценки трех способов прогностического расчета диаметра карстово-обвального провала “простого” типа (d) для участка существующего провала (см. рис. 7) с фактическим диаметром (d_f), равным 16.0 м

Автор способа	Результаты промежуточных и окончательных прогностических расчетов и оценок	Оценка точности прогноза	
		Абсолютная ошибка прогноза ($d - d_f$)	Относительная ошибка прогноза ($d - d_f$)/ d_f
Г.М. Троицкий	Расчет по формуле (2): $\xi = 0.609$ Расчет по формуле (1): $d = 30.2$ м	14.2 м	0.89
В.В. Савин	Расчет по формуле (4): $\xi = 0.438$ Расчет по формуле (3): $d = 24.1$ м	8.1 м	0.51
В.П. Хоменко	Расчет по формуле (7): $f = 0.547$ Расчет по формуле (6): $d_0 = 22.9$ м Провал должен иметь цилиндрическую форму ($d_0 < 2fm = 32.8$ м) Расчет по формуле (4): $\xi = 0.438$ Расчет по формуле (5): $d = 18.0$ м Обрушение должно завершиться образованием провала ($d < d_0$)	2.0 м	0.13

XX века. По существу, первый подход рассматривает карстово-обвальное провалообразование “простого” типа как одностадийный процесс, а второй — как двухстадийный.

3. Результаты, получаемые с помощью трех (из многих применяемых в настоящее время) способов расчета диаметра карстово-обвального провала “простого” типа, были корректно сопоставлены, благодаря использованию ими одинаковых исходных параметров. Сравнение полученных с помощью этих трех способов прогностических решений применительно к одному и тому же объекту показало наибольшую адекватность способа, рассматривающего данный тип карстового провалообразования как двухстадийный процесс, разумеется, с учетом конкретных геологических условий. Кроме того, в отличие от других двух, этот способ позволяет оценивать конфигурацию ожидаемого провала в вертикальном разрезе и принципиальную возможность его образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рожественский А.П. и др. Карст Башкортостана. Уфа: Информреклама, 2002. 384 с.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
3. Копосов Е.В., Тычина О.В. Изучение фаз развития и учет возраста провальных воронок при инженерно-геологическом районировании закарстованных территорий // Инженерная геология. 1983. № 5. С. 67–74.
4. Леоненко М.В., Юргин О.В., Хоменко В.П., Лаврушевич А.А. Риск образования карста (на примере провала близ деревни Неледино Шатковского района Нижегородской области) // Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата — ГЕОРИСК-2018: Матер. X Междунар. научно-практ. конф.: в 2 т. / Отв. Ред. Н.Г. Мавлянова. М.: РУДН, 2018. Т. 1. С. 77–82.
5. Постоев Г.П. Предельное состояние и деформации грунтов в массиве (оползни, карстовые провалы, осадки грунтовых оснований). М.; СПб.: Нестор-История, 2013. 100 с.
6. Протодьяконов М.М. Попытка опытного исследования законов давления пород на горные выработки // Горный журнал. 1912. № 4–5. С. 12–39.
7. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях / НИИОСП им. Герсеева. М.: ПЭМ ВНИИИС, 1985. 78 с.
8. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС Минстроя России, 1995. 167 с.
9. Савин В.В., Хусаинов И.Ж. Определение критического радиуса карстовой полости // Автомобильные дороги. 1984. № 12. С. 20–21.
10. Толмачев В.В., Карпов Е.Г., Хоменко В.П., Мартин В.И., Давыдько Р.Б. Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 46–59.
11. Хоменко В.П. Карстово-обвальные провалы “простого” типа: полевые исследования // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 40–48.
12. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: матер. Междунар. симп. / Под ред. В.Н. Катаева и др. Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 50–60.
13. Bierbaumer A. Die Dimensionierung des Tunnelmauerwerkes. Leipzig: W. Engelmann, 1913. 102 p.

14. *Foose R.M.* Ground-Water Behavior in the Hershey Valley, Pennsylvania // *Bulletin of the Geological Society of America*. 1953. Vol. 64. No 6. P. 623–645.
15. *Gutiérrez F., Cooper A.H., Johnson K.S.* Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas // *Environmental Geology*. 2008. Vol. 53. No 5. P. 1008–1022.
16. *Khomenko V.P., Leonenko M.V.* The collapse of clays covering a karst cavity: in-situ investigation, conceptual model and prediction // *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proc. of the XVI ECSMGE*, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015. Vol. 4: Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015. P. 2269–2274.
17. *Waltham A.C., Fookes P.G.* Engineering classification of karst ground conditions // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2003. Vol. 36. P. 101–118.

COMPARISON OF THREE APPROACHES TO CALCULATING DIAMETER OF A DROPOUT SINKHOLE

V. P. Khomenko^{a, #}, M. V. Leonenko^{b, ##}, and A. O. Dzutsev^{c, ###}

^a *National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia*

^b *Dzerzhinsk Karst Laboratory, pr. Tsiolkovskogo, 4a, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod oblast, 606025 Russia*

^c *Avrora SK Co., ul. Luzhniki, 24, str. 22, Moscow, 119048 Russia*

[#] *E-mail: oms@mgsu.ru*

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

^{###} *E-mail: avrorask@inbox.ru*

The possibility of sinkhole size prediction in the areas, where soluble rocks are covered by impermeable clay layer is considered. Such sinkholes are named by English-speaking authors as “dropout sinkholes” or “cover collapse sinkholes”, because the process of their formation includes collapse (dropping) of clay covering soluble rocks into a karst cavity. Triggers of this effect are: (1) widening of a cavity below the clay due to dissolution of a soluble rock by groundwater; (2) lowering of hydraulic head in confined karst aquifer, primarily caused by groundwater pumping, which results in decreased support of the overlying clay layer; (3) a dynamic load on the clays, which can have either natural or man-made origin. Fresh dropout sinkholes generally have configuration similar to vertical right circular cylinder, but sometimes their shape can be dome-like with very unstable ground “cantilevers”. The appearance of these forms under foundations can lead to deformation and even to destruction of buildings, structures, and infrastructure facilities. Two concepts exist, which can be used as basis for creating models of soil mechanics to calculate diameter of a dropout sinkhole. The first one is based on a viewpoint that clay collapse into a cavity after a trigger action is displayed immediately at the ground surface as a collapse sink. According to the second concept, the preliminary subsurface collapse of clay occurs as fall of ground block resembling a circular paraboloid. As a result, a dome-like cavity appears in the clay layer and above-lying clay fall into it to form a collapse sink. There are no prediction methods based on the two above-mentioned conceptions. The developed approaches to prediction of a dropout sinkhole diameter are adequately comparable, as they use the same input calculation parameters. The prediction results based on these approaches have been compared to an actual diameter of fresh dropout sinkhole. This verification have allowed us to infer that most adequate is the approach based on concept of initial subsurface clay’s collapse preceding the final collapse sink formation.

Keywords: *karst, clays, collapse, sinkhole, prediction*

REFERENCES

1. *Abdrakhmanov, R.F., Martin, V.I., Popov, V.G., Rozhdestvenskii, A.P., et al.* *Karst Bashkortostana* [Karst of Bashkortostan]. Ufa, Informreklama Publ., 2002, 384 p. (in Russian)
2. *Anikeev, A.V.* *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh raionakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapse and subsidence sinks in karst regions: formation mechanisms, prediction, and risk assessment]. Moscow, RUDN Univ. Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
3. *Koposov, E.V., Tychina, O.V.* *Izuchenie faz razvitiya i uchet vozrasta proval'nykh voronok pri inzhenerno-geologicheskoy rayonirovaniy zakarstovannykh territoriy* [A study of the stages of development and age of slump holes for engineering geological zonation of karst areas]. *Inzhenernaya geologiya*, 1983, no. 5, pp. 67–74. (in Russian)
4. *Leonenko, M.V., Yurgin, O.V., Khomenko, V.P., Lavrusovich, A.A.* *Risk obrazovaniya karsta (na primere provala bliz derevni Neledino Shatkovskogo raiona Nizhegorodskoi oblasti)* [Risk of karst formation (by the example of a sinkhole near Neledino village in Shat-

- kovsky District, Nizhny Novgorod region)]. *Analiz, prognoz i upravlenie prirodnymi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata – GEORISK-2018: Materialy X Mezhd. nauchno-prak. konferentsii* [Analysis, prediction, and natural risk management considering global climate change – GEORISK-2018. Proc. 10th Int. Sci.-Practical Conf.]. Moscow, RUDN Publ., 2018. vol. 1, pp. 77–82. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Predel'noe sostoyanie i deformatsii gruntov v massive (opolzni, karstovye provaly, osadki gruntovykh osnovanii)* [Critical state and strain of soil in a ground-mass (landslide, sinkhole, ground settlement)]. Moscow; St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2013, 100 p. (in Russian)
 6. Protodyakonov, M.M. *Popytka opytnogo issledovaniya zakonov davleniya porod na gornye vyrabotki* [Attempt of experimental research of laws of soil's pressure on mine openings]. *Gornyi zhurnal*, 1912, no. 4–5, pp. 12–39. (in Russian)
 7. *Rekomendatsii po proektirovaniyu fundamentov na zakarstovannykh territoriyakh* [Guidance on foundation design in karst areas]. Moscow, PEM VNIIS Publ., 1985, 78 p. (in Russian)
 8. Savarenskii, I.A., Mironov, N.A. *Rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam v raionakh razvitiya karsta* [Manual for geological site investigations in karst-prone areas]. Moscow, PNIIS Publ., 1995, 167 p. (in Russian)
 9. Savin, V.V., Khusainov, I.Zh. *Opreделение критического радиуса карстовой полости* [Determination of a critical radius of karst cavity]. *Avtomobil'nye dorogi*, 1984, no. 12, pp. 20–21. (in Russian)
 10. Tolmachev, V.V., Karpov, E.G., Khomenko, V.P., Martin, V.I., Davyd'ko, R.B. *Mekhanizm deformatsii gornykh porod nad podzemnymi karstovymi formami* [A mechanism of rock deformation above the underground karst forms]. *Inzhenernaya geologiya*, 1982, no. 4, pp. 46–59. (in Russian)
 11. Khomenko, V.P. *Karstovo-obval'nye provaly "prostogo" tipa: polevye issledovaniya* [Collapse sinkholes of "simple" type: in situ investigations]. *Inzhenernaya geologiya*, 2009, no. 4, pp. 40–48. (in Russian)
 12. Khomenko, V.P. *Karstovoe provaloobrazovanie: mekhanizm i otsenka opasnosti* [Collapse sinkholes formation: mechanisms and hazard assessment]. *Ekologicheskaya bezopasnost' i stroitel'stvo v karstovykh raionakh. Materialy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Environmental safety and construction in karst areas. Proc. of the International Symposium]. Kataev, V.N., Zolotarev, D.R., Shcherbakov, S.V., Shilova, A.V., Eds. Perm, Perm State University Publ., 2015, pp. 50–60. (in Russian)
 13. Bierbaumer, A. *Die Dimensionierung des Tunnel-mauerwerkes*. Leipzig, W. Engelmann, 1913. 102 p. (in German)
 14. Foote, R.M. Groundwater behavior in the Hershey Valley, Pennsylvania. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1953, vol. 64, no. 6, pp. 623–645.
 15. Gutiérrez, F., Cooper, A.H., Johnson, K.S. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas. *Environmental Geology*, 2008, vol. 53, no. 5, pp. 1008–1022.
 16. Khomenko, V.P., Leonenko, M.V. The collapse of clays covering a karst cavity: in-situ investigation, conceptual model and prediction. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Proc. of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015, vol. 4. Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015, pp. 2269–2274.
 17. Waltham, A.C., Fookes, P.G. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2003, vol. 36, pp. 101–118.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.054:502.53

ПОВЕДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ “ПОЧВА–КОНДЕНСАТ–РАСТЕНИЯ” НА ОБЪЕКТАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ г. УЛАН-УДЭ

© 2023 г. Т. В. Чередова^{1,2,*}, С. Г. Дорошкевич¹, С. В. Бартанова¹

¹ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
ул. Сахьяновой, ба, Улан-Удэ, 670047 Россия

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
ул. Ключевская, 40в, Улан-Удэ, 670013 Россия

*E-mail: cheredova-tv@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.10.2022 г.

После доработки 18.11.2022 г.

Принята к публикации 29.11.2022 г.

Исследовано влияние на компоненты окружающей среды объектов захоронения отходов — закрытых и заброшенных свалок бытовых и промышленных отходов г. Улан-Удэ Республики Бурятия. Подробно рассмотрено поведение тяжелых металлов (Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg, а также Cr) в почвах, растительности, испаряющейся влаге (конденсате). Выявлено, что почвы, растения и конденсат на свалках обогащены тяжелыми металлами (ТМ) по сравнению с фоновыми участками. В почвах на свалках наблюдаются превышения норм предельно-допустимых концентраций ТМ от 1.1 до 90 раз. Концентрации ТМ в растениях на свалках превышают фоновые показатели от 1.1 до 104 раз. Превышение максимально-допустимого уровня содержания ТМ в растениях выявлено для Zn, Cd, Cr. В конденсате, отобранном на свалках, зафиксированы превышение нормативов ПДК_{рыб-хоз} по Cu, Zn, Hg. Установлен схожий характер распределения ТМ в конденсате и растениях. Более 80% суммарного вклада от содержания ТМ в составе конденсата и растений вносят Zn и Cu, в почве — Zn, Cr, Ni, Cu, Co, Pb. На каждой свалке рассчитаны суммарные индексы (Z_c) загрязнения для почв, конденсата и растительности. На основании Z_c объекты исследования проранжированы по степени их опасности для окружающей среды, что может являться основанием для принятия решения о необходимости рекультивации нарушенных территорий.

Ключевые слова: свалки, бытовые и промышленные отходы, почва, растения, конденсат

DOI: 10.31857/S0869780923010022, **EDN:** HSPAMS

ВВЕДЕНИЕ

Объекты размещения промышленных и бытовых отходов являются экологической проблемой многих населенных пунктов, как на территории России, так и за ее пределами [9, 12, 13]. В частности, в Республике Бурятия практически каждое муниципальное образование располагает свалкой отходов. По данным территориальной схемы в области обращения с отходами¹ всего в республике насчитывается 5 полигонов, включенных в государственный реестр размещения отходов (ГРОРО) и 18 свалок, не включенных в ГРОРО. Особую опасность представляют собой свалки, открытые

до вступления в силу жестких экологических требований по организации объектов размещения отходов (СП 320.1325800.2017). Такие свалки располагали ранее, как правило, в низинных частях рельефа, поймах рек, оврагах, т.е. в геологической среде наименее устойчивой к загрязнению продуктами разложения свалочного материала [9]. При этом не проводились работы по подготовке основания свалки, контролю состава и объемов захораниваемых отходов, пересыпке отходов изолирующим материалом, что усиливало процессы рассеяния потенциально опасных веществ во всех средах, окружающих свалки. Стоит отметить, что в настоящее время администрациями муниципальных образований республики проводятся работы по ликвидации несанкционированных свалок: они ставятся на учет, разрабатываются проекты их рекультивации. Вместе с тем значительное количество свалок остается на своих местах. На территории городского округа “Город

¹ Приказ министерства природных ресурсов республики Бурятия от 29.04.2020 № 159-ПР “Об утверждении Территориальной схемы в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Бурятия” [Электронный ресурс]. URL: <http://ias.burpriroda.ru/ekologiya/tsoo.php> (дата обращения 10.10.2022).

Таблица 1. Характеристика объектов размещения отходов

Местоположение	Тип захороненных отходов	Площадь объекта, га	Объем накопленных отходов, тыс. т	Период функционирования объекта размещения отходов	Расстояние до ближайшего жилого массива, м
п. Сотниково	Бытовые	2.8	97.1	2011–2015	1000
п. Стеклозавод	Бытовые и строительные	65	4898	1960–2006	150
п. Бабасанова	Промышленные	10	Не известно	1960–1989 (вскрыта 2000–2003)	100
п. Площадка	Золошлаковые	4.5	245	2011–2023	10

Улан-Удэ” к таким объектам в частности относятся свалки, расположенные в поселках Сотниково, Восточный, Стеклозавод, Площадка.

Полигоны бытовых и промышленных отходов являются источниками поступления в окружающую среду различных продуктов минерального и органического происхождения [2, 4]. Особую опасность представляет высокая степень загрязненности большинства полигонов тяжелыми металлами (ТМ) [6], вынос которых за пределы полигона может привести к загрязнению ими поверхностных и подземных вод, почв и грунтов, а также к угнетению растительности на примыкающих к полигонам территориях. ТМ обладают различной степенью биогеохимической активности: к примеру, установлено, что Cd, Br, Cs очень легко поглощаются растениями, в то время как Ba, Ti, Pb — чрезвычайно слабо.

Цель настоящего исследования — анализ комплексной миграции ТМ, обладающих различной биогеохимической активностью, в системе “почва—вода—растение” с оценкой возможности распространения в среде техногенно-нарушенных территорий городского округа г. Улан-Удэ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследований — законсервированные свалки бытовых и промышленных отходов, расположенные в окрестностях г. Улан-Удэ (табл. 1).

Свалка бытовых отходов п. Сотниково была организована в 2011 г. и предназначалась для складирования коммунальных отходов г. Улан-Удэ. После заполнения одной из карт свалки на площади 2.77 га выяснилось, что ее местоположение попадает в зону с особыми условиями использования аэропорта г. Улан-Удэ (реестровый номер 03: 00—6.184), и растущая свалка может помешать посадке авиационного транспорта, поэтому официально свалка была закрыта в 2015 г. Проект рекультивации свалки по ряду причин не прошел государственную экологическую экспертизу, и открытая карта свалки оказалась заброшенной. На техногенном грунте свалочного тела

естественным путем начал формироваться почвенно-растительный слой, достигающий в некоторых местах 20 см, появились кустарники (вишня, смородина, ильм) и многолетние травянистые растения. К сожалению, несанкционированный вывоз населением мусора продолжается, что способствует загрязнению и захламлению прилегающей территории свалки.

Свалка бытовых и строительных отходов п. Стеклозавод функционировала на территории г. Улан-Удэ 46 лет (1960–2006 гг.). К настоящему времени объем накопленных отходов составляет около 7.31 млн м³. Свалка продолжает использоваться для складирования снега от уборки городской территории в зимний период. На свалке сформирован устойчивый почвенно-растительный слой, глубина почвенного горизонта достигает 10–30 см. Свалка имеет ограждение и пункт охраны, поэтому прилегающая территория свалки находится в удовлетворительном состоянии.

Свалка п. Площадка размещена на территории отработанного глиняного карьера г. Улан-Удэ и с 2011 г. используется Улан-Удэнским авиационным заводом в качестве площадки рекультивации. Площадь выделенного под складирование отходов участка — 4.5 га. Рекультивация осуществляется в основном золошлаковыми отходами от котельной завода и инертными строительными отходами. На свалке ведется регулярный мониторинг загрязнения подземных вод. К настоящему времени рекультивированная часть карьера засыпана грунтом толщиной 20–40 см. На оставшейся территории рекультивация продолжается до 2023 г.

Свалка в п. Восточный в местности падь Бабасанова (далее п. Бабасанова) была организована ориентировочно в 1960 г. На свалку вывозился широкий ассортимент промышленных отходов: макулатура, ветошь, отходы пластмасс, опилки, шламы гальванических ванн, шламы алюмината, отходы литейного производства, строительный мусор, карбидный ил, шлак и зола котельных, отработанные растворители и другие отходы предприятий города, точный состав которых не уста-

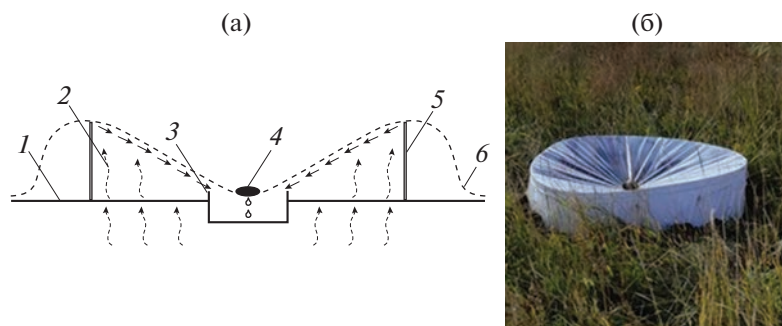


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) мобильной установки для сбора конденсата: 1 — поверхность почвы; 2 — испаряющаяся влага (конденсат); 3 — емкость для сбора конденсата; 4 — груз; 5 — стенки цилиндра; 6 — полиэтиленовая пленка.

новлен. Известно, что предварительных работ по устранению возможностей дренажа токсичных веществ с дождевыми и снеговыми водами не проведено. Площадь, занятая свалкой, — около 10 га, из них 5 га — основное тело высотой 7–10 м. В 1989 г. свалка была официально закрыта и засыпана золошлаковыми отходами, но в период 2000–2003 гг. вновь вскрыта «охотниками за черным металлом». К настоящему времени на свалке сформирован растительный слой, встречаются кустарники (ильм, облепиха).

Перечисленные объекты представляют собой потенциальную опасность не только для окружающей среды, но и для населения, так как в силу активной застройки в частном секторе многие из рассматриваемых свалок оказались в окружении жилого массива дачных хозяйств, активно развивающихся на этой территории в течение последнего десятилетия.

Для проведения комплексной геоэкологической оценки на исследуемых объектах размещения промышленных и бытовых отходов г. Улан-Удэ были проведены отборы проб почв/грунтов, растительности и испаряющейся влаги (конденсата) непосредственно на теле свалок и на фоновых площадках. В качестве фона были выбраны незагрязненные участки за границами свалок с учетом розы ветров и орографических особенностей местности. Всего было отобрано 69 проб: 32 почв/грунтов, 27 растений, 10 конденсатов.

Для отбора проб почв/грунтов территория изыскания разбивалась на пробные площадки площадью 25 м², на каждой из которых отбиралось не менее одной объединенной пробы методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017²,

² ГОСТ 17.4.3.01-2017. «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» (введен в действие Приказом Росстандарта от 01.06.2018 № 302-ст). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508>.

ГОСТ 17.4.4.02-2017³ из поверхностного слоя с погружением на глубину 0.3 м.

Пробы растительности отбирались на тех же участках, что и образцы почв/грунтов. Основной критерией при выборе растений — их наличие на всех изучаемых участках. Было выбрано две группы растений [5] — травянистые: пырей ползучий (*Elytrigia repens*), марь белая (*Chenopodium album*), крапива коноплевая (*Urtica cannabina*), полынь пижмолистная (*Artemisia tanacetifolia*), полынь метельчатая (*Artemisia scoparia*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*), и древесные: ильм приземистый (*Ulmus pumila*).

Пробы конденсата были отобраны с использованием мобильной установки по сбору конденсата, разработанной сотрудниками лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН (А.М. Плюсин, А.В. Залуцкий). Принцип работы установки основан на солнечной дистилляции (рис. 1).

Мобильная установка, состоящая из ПВХ-цилиндра (диаметром 1 м² и высотой 0.5 м), устанавливалась на поверхности почвы/грунта. В центре окружающейности ставилась емкость для сбора конденсата. Цилиндр закрывался полиэтиленовой пленкой, в центр которой помещался груз, создающий ребра жесткости. Края пленки выводились за края цилиндра и закреплялись для предотвращения выхода испаряющейся влаги. По мере нагревания поверхности от солнечной энергии, объем установки насыщался испарениями почвенной влаги, которые при наступлении точки росы конденсировались на внутренней стороне пленки (6) и стекали по ребрам жесткости в емкость (3). Объем конденсата варьировался от 10 до 60 см³.

³ ГОСТ 17.4.4.02-2017. «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа» (введен в действие Приказом Росстандарта от 17.04.2018 № 202-ст). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158951>.

Содержание химических элементов в почве определяли в ЦКП “Геоспектр” ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа на кристалл-дифракционном спектрометре ARL Perform’X 4200 (доверительная вероятность $P = 95\%$) [3]. Анализ элементного состава растений и конденсата был проведен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ISP-MS) на масс-спектрометре “Agilent 7500 ce” (США) в Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск). Ошибки измерения оценивали с помощью показателя зависимости коэффициента вариации (RCD, %) от величины аналитического сигнала (N , имп/с), установленного экспериментально: $RSD\% = -125.71N^{-0.33103}$, где $N = 20-20000$ имп/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа получены сведения о содержании в почве 30 химических элементов в основном лито- и халькофильной геохимических групп, прежде всего металлов (Rb, Cs, Sr, Ba, V, Gr, Ni, Cu, Zn и др.), в том числе редкоземельных (Ce) и радиоактивных (U, Th), а также полуметаллов (Sb, As) и неметаллов (S, Cl, Br). По результатам проведенного анализа методом ISP-MS в образцах растительности и конденсата идентифицировано 72 элемента: практически все металлы, включая группу редкоземельных металлов и радиоактивных элементов и неметаллы (P, S, Cl, Se, I, Br). Перечень ТМ, подлежащих более подробному анализу, был составлен на основе классификации Н.Ф. Реймерса [7], к ним было отнесено 11 элементов: Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg и Cr.

Для оценки степени химического загрязнения почв были рассчитаны коэффициенты концентрации ТМ (K_{ki}) и суммарный показатель загрязнения почв ($Z_{c(n)}$) по формулам (1), (2).

$$K_{ki} = \frac{C_i}{C_{\phi i}}, \quad (1)$$

где C_i и $C_{\phi i}$ — концентрация и фоновая концентрация i -го элемента в почве соответственно, мг/кг.

$$Z_{c(n)} = \sum_{i=1}^n K_{ki} - (n-1), \quad (2)$$

где K_{ki} — коэффициент концентрации i -го элемента в почве; n — число изучаемых элементов.

При установлении категории химического загрязнения почвы была использована следующая градация: $Z_{c(n)} < 16$ — допустимая; $Z_{c(n)} = 16-32$ — умеренно-опасная; $Z_{c(n)} = 32-128$ — опасная; $Z_{c(n)} > 128$ — чрезвычайно опасная категория за-

грязнения⁴. Результаты представлены в табл. 2. В грунтах на свалке п. Бабасанова выявлен весь спектр изучаемых ТМ, на свалке п. Сотниково в перечне выявленных элементов отсутствовал Sn, на свалках п. Площадка и п. Стеклозавод Cd, Sn, Sb не обнаружены. В большинстве случаев содержание ТМ в почвах/грунтах на свалках было выше фоновых показателей. Концентрация выявленных ТМ в грунтах на свалках превышает нормы ПДК в широком диапазоне: п. Сотниково от 1.3 ПДК (Sb) до 13.2 ПДК (Gr), п. Стеклозавод от 1.6 ПДК (Ni) до 7.3 ПДК (Gr), п. Площадка от 1.1 ПДК (Zn) до 6.0 ПДК (Cr), п. Бабасанова от 1.2 ПДК (Ni) до 90 ПДК (Cd). Особое внимание стоит обратить на свалку п. Бабасанова, в почвах/грунтах которой содержание ТМ превышает нормы ПДК и кларковые значения в десятки раз.

По суммарному показателю загрязнения почвы ТМ грунты частично рекультивированных объектов размещения отходов (п. Площадка и п. Стеклозавод) характеризуются допустимым уровнем загрязнения ($Z_{c(n)} < 2.87$), п. Сотниково — умеренно-опасным ($Z_{c(n)} = 18.4$), п. Бабасанова — чрезвычайно-опасным ($Z_{c(n)} = 536.81$). По показателю $Z_{c(n)}$, рассматриваемые объекты захоронения отходов можно разместить в следующий сравнительный ряд (по уменьшению степени загрязнения почв): п. Бабасанова > п. Сотниково > п. Стеклозавод > п. Площадка.

Содержание тяжелых металлов в растениях, отобранных на свалках (табл. 3), находится в пределах естественного диапазона колебаний, принятого на основании работ геохимиков А. Кабата-Пендиас и Х. Пендиаса [11] и не превышает максимально-допустимые уровни (МДУ)⁵.

Исключения составляют Zn, Cd, Cr, превышения МДУ по которым достигают до 25 раз. Максимальные концентрации ТМ были зафиксированы в растениях, отобранных на свалке промышленных отходов п. Бабасанова, характеризующейся чрезвычайно-опасной категорией загрязнения почв, превышения количества ТМ над фоном на этой свалке варьировались от 1.3 (Ni) до 104.2 (Cd). Повышенное содержание ТМ наблюдалось не только в растениях, отобранных на теле свалки п. Бабасанова, но и в зоне ее влияния на расстоянии около 200 м по ходу движения подземных

⁴ Методические указания 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/6/6862/>.

⁵ Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госполипа в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках /утв. Главным управлением ветеринарии Государственного агропромышленного комитета СССР 7 августа 1987 г. № 123-4/281-8. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200086835> (дата обращения 10.10.2022).

Таблица 2. Диапазон содержания тяжелых металлов (числитель, мг/кг), коэффициент концентрации (знаменатель, $K_k^{\max}$) и суммарный индекс загрязнения почв ($Z_{c(p)}$) на свалках г. Улан-Удэ

Местоположение	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Co	Sb	Sn	Cr	$Z_{c(p)}$
п. Сотниково	$\frac{18-31}{1.82}$	$\frac{31-53}{2.29}$	$\frac{46-269}{4.64}$	$\frac{19-35}{1.17}$	$\frac{2.8-3.1}{6.24}$	$\frac{9-22}{1.16}$	$\frac{6.0-6.7}{6.70}$	н/о	$\frac{24-79}{1.38}$	18.4
п. Стеклозавод	$\frac{24-75}{2.14}$	$\frac{13-17}{1.21}$	$\frac{40-86}{1.23}$	$\frac{18-20}{1.05}$	н/о	$\frac{9-20}{1.33}$	н/о	н/о	$\frac{34-44}{0.92}$	2.87
п. Площадка	$\frac{20-23}{1.00}$	$\frac{20-21}{0.86}$	$\frac{55-60}{0.87}$	$\frac{18-20}{0.79}$	н/о	$\frac{8-11}{0.65}$	н/о	н/о	$\frac{33-36}{0.67}$	—
п. Бабасанова	$\frac{17-735}{33.41}$	$\frac{22-1447}{76.16}$	$\frac{78-3147}{50.76}$	$\frac{24-46}{6.35}$	$\frac{9.1-45}{189.82}$	$\frac{12-33}{2.20}$	$\frac{5.7-47}{47.11}$	$\frac{13-229}{228.98}$	$\frac{40-451}{0.02}$	536.81
ПДК, мг/кг	32	33	55	20	0.5	5	4.5	—	6	—
Кларк в почве [1], мг/кг	10	20	50	34	0.5	8.9	—	10	190	—

Примечание: н/о — не обнаружено; “—” — не установлено.

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов (числитель, мкг/кг), коэффициенты концентрации (знаменатель, K_k) и суммарный индекс загрязнения растений ($Z_{c(p)}$) на свалках г. Улан-Удэ

Местоположение	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Co	Sb	Sn	Bi	Hg	Cr	$Z_{c(p)}$
п. Сотниково	$\frac{149}{1.2}$	$\frac{5000}{1.5}$	$\frac{13800}{3.2}$	$\frac{320}{2.0}$	$\frac{100}{1.7}$	$\frac{85}{2.1}$	$\frac{10}{2.6}$	$\frac{22}{1.2}$	$\frac{3.8}{2.0}$	$\frac{31}{0.9}$	$\frac{250}{1.1}$	9.5
п. Стеклозавод	$\frac{400}{3.7}$	$\frac{6000}{2.1}$	$\frac{29000}{5.9}$	$\frac{480}{1.1}$	$\frac{500}{6.8}$	$\frac{107}{1.3}$	$\frac{34}{2.6}$	$\frac{14}{1.4}$	$\frac{2.9}{2.4}$	$\frac{42}{7.0}$	$\frac{330}{1.1}$	25.4
п. Площадка	$\frac{820}{1.5}$	$\frac{8100}{1.9}$	$\frac{75000}{7.7}$	$\frac{1020}{1.4}$	$\frac{910}{3.8}$	$\frac{220}{3.1}$	$\frac{24}{1.2}$	$\frac{71}{2.0}$	$\frac{9.3}{3.6}$	$\frac{25}{0.9}$	$\frac{1490}{2.9}$	20.0
п. Бабасанова (тело свалки)	$\frac{1250}{9.1}$	$\frac{14300}{1.9}$	$\frac{76000}{5.1}$	$\frac{780}{1.3}$	$\frac{7400}{104.2}$	$\frac{129}{1.8}$	$\frac{72}{6.5}$	$\frac{65}{3.3}$	$\frac{3.2}{2.1}$	$\frac{29.0}{1.5}$	$\frac{900}{3.0}$	129.8
п. Бабасанова (зона влияния)	$\frac{340}{2.6}$	$\frac{10800}{1.4}$	$\frac{33000}{2.2}$	$\frac{630}{1.1}$	$\frac{260}{3.7}$	$\frac{230}{3.2}$	$\frac{15}{1.4}$	$\frac{20}{1.0}$	$\frac{3.4}{2.3}$	$\frac{25}{1.3}$	$\frac{890}{3.0}$	13.2
Пределы колебаний в травянистых растениях [11], мкг/кг	100–10000	1000–33100	6000–80000	70–4800	30–1260	10–390	до 60	40–100	до 20	0.9–21	110–3400	—
Максимально допустимый уровень, мкг/кг	5000	30000	50000	3000	300	1000	500	—	—	50	500	—

Примечание: “—” — не установлено.

вод. На свалке п. Сотниково превышения концентрации ТМ над фоном варьировались от 1.1 (Cr) до 3.2 (Zn), на свалках п. Стеклозавод и п. Площадка — от 1.1 (Cr, Ni) до 7.7 (Zn). Очевидно, что на химический состав растений оказали влияние захороненные отходы, размещенные не только в зоне питания корней растений, но и в более глубоких горизонтах. На свалке п. Площадка — это золошлаковые отходы, на свалке п. Стеклозавод — бытовые отходы, накапливающиеся в течение многих лет. Немаловажным фактором поступления химических элементов в растения является возраст свалки: на более старых свалках наблюдаются более высокие концентрации тяжелых ме-

таллов, чем на относительно “молодых”. Для составления ранжирующего ряда, отражающего содержание тяжелых элементов в растениях на разных свалках, по аналогии с суммарным показателем загрязнения почв был рассчитан суммарный показатель загрязнения растений ($Z_{c(p)}$). Рассматриваемые объекты захоронения отходов можно разместить в следующий сравнительный ряд (по уменьшению $Z_{c(p)}$): п. Бабасанова (129.8) > п. Стеклозавод (25.4) > п. Площадка (20.0) > п. Сотниково (9.5). Полученный сравнительный ряд отличается от аналогичного ряда, составленного для почв, в частности свалка п. Сотниково характеризуется повышенным уровнем загрязнения

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов (числитель, мкг/дм³), коэффициенты концентрации (знаменатель, K_k) и суммарный индекс загрязнения конденсата ($Z_{с(к)}$) на свалках г. Улан-Удэ

Местоположение	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Co	Sb	Sn	Bi	Hg	Cr	$Z_{с(к)}$
п. Сотниково	$\frac{0.69}{1.53}$	$\frac{6.8}{1.45}$	$\frac{13.2}{1.81}$	$\frac{0.97}{1.45}$	$\frac{0.056}{1.24}$	$\frac{0.124}{1.43}$	$\frac{0.095}{1.34}$	$\frac{0.15}{0.94}$	$\frac{0.007}{2.12}$	$\frac{0.1}{3.23}$	$\frac{0.7}{0.97}$	7.51
п. Стеклозавод	$\frac{1.63}{2.40}$	$\frac{5.8}{1.93}$	$\frac{23}{1.42}$	$\frac{1.15}{1.39}$	$\frac{0.07}{1.00}$	$\frac{0.153}{2.43}$	$\frac{0.21}{0.72}$	$\frac{0.046}{0.96}$	$\frac{0.008}{1.54}$	$\frac{0.11}{1.10}$	$\frac{0.93}{1.00}$	5.89
п. Площадка	$\frac{0.84}{0.92}$	$\frac{3.3}{1.00}$	$\frac{8.2}{1.34}$	$\frac{1.02}{0.96}$	$\frac{0.051}{1.59}$	$\frac{0.22}{1.69}$	$\frac{0.22}{2.89}$	$\frac{0.047}{0.34}$	$\frac{0.007}{1.89}$	$\frac{0.08}{0.89}$	$\frac{0.86}{1.00}$	4.51
п. Бабасанова	$\frac{1.79}{2.63}$	$\frac{7.8}{1.86}$	$\frac{26}{2.60}$	$\frac{1.7}{2.39}$	$\frac{0.18}{4.29}$	$\frac{0.23}{2.32}$	$\frac{0.25}{3.42}$	$\frac{0.096}{0.82}$	$\frac{0.009}{0.56}$	$\frac{0.09}{0.69}$	$\frac{1.09}{1.65}$	13.23
ПДК _{сан-гиг}	10	1000	5000	20	1	100	5	2000	100	0.5	50	—
ПДК _{рыб-хоз}	6	1	10	10	5	10	—	112	—	0.01	20	—

Примечание: “—” — не установлено.

почв, но пониженным уровнем содержания ТМ в растениях по сравнению с фоном.

Геохимическая миграция тяжелых металлов в теле свалки может осуществляться за счет различных процессов: в результате прессования отходов, за счет фильтрации с нисходящей влагой атмосферных осадков, посредством перемещения живых организмов, населяющих свалку (черви, микроорганизмы), и др. В рамках настоящего исследования особое внимание уделено миграции ТМ с капиллярной влагой, образование которой возможно внутри техногенного грунта. Биогеохимические процессы в теле полигона способствуют переходу ТМ, содержащихся в составе отходов, в подвижную водорастворимую форму и их миграции в результате испарения к поверхности тела полигона.

Попадая в зону питания корней, капиллярная влага, обогащенная ТМ, становится питательной средой для растений, произрастающих на полигоне. В табл. 4 показано содержание ТМ в конденсате, отобранном на объектах захоронения отходов, и рассчитанный по аналогии с $Z_{с(п)}$ и $Z_{с(р)}$ суммарный показатель загрязнения конденсата ($Z_{с(к)}$). В связи с отсутствием установленных экологических нормативов для конденсата в качестве эталона сравнения были выбраны санитарно-гигиенические и рыбохозяйственные нормы предельно-допустимых концентраций (ПДК_{сан-гиг}, ПДК_{рыб-хоз}).

В конденсате, отобранном на свалках, наблюдается превышение норм ПДК_{рыб-хоз} по Cu, Zn, Hg. Наиболее высокие концентрации ТМ в конденсате наблюдаются на свалке промышленных отходов п. Бабасанова, где отмечены максимальные концентрации для Pb (1.79 мкг/дм³), Cu (7.8 мкг/дм³), Zn (26 мкг/дм³), Ni (1.7 мкг/дм³), Cr (1.09 мкг/дм³) и других элементов. Превышения концентраций

загрязняющих веществ в конденсате над фоновыми показателями на свалке п. Бабасанова варьируются от 1.65 (Cr) до 4.29 (Cd). К следующим по уровню загрязнения относятся конденсаты: п. Сотниково ($K_k = 0.94–3.23$), п. Стеклозавод ($K_k = 0.72–2.43$), п. Площадка ($K_k = 0.34–2.89$). По содержанию ТМ в конденсате рассматриваемые объекты можно разместить в следующий сравнительный ряд (по убыванию $Z_{с(к)}$): п. Бабасанова (13.23) > п. Сотниково (7.51) > п. Стеклозавод (5.89) > п. Площадка (4.51).

Для всех изученных свалок характерно схожее распределение тяжелых металлов в исследуемых средах. В качестве примера на рис. 2 представлены графики распределения ТМ в почве, конденсате и растениях на свалке и фоновом участке п. Сотниково.

Для более подробного анализа распределения ТМ в системе “почва–вода–растение” были составлены сравнительные геохимические ряды распределения вклада ТМ, основываясь на % массовой концентрации содержания элемента в каждой из изучаемых сред (рис. 3). В частности, для свалки п. Сотниково сравнительные геохимические ряды распределения имеют следующий вид:

— в растениях — Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Co > Hg > Sn > Bi;

— в конденсате — Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Sn > Co > Hg > Sb > Cd > Bi;

— в почве — Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > Co > Sb = Sn > Cd.

Анализ геохимических рядов (см. рис. 3) показал схожий характер распределения ТМ в конденсате и растениях. Более 80% суммарного вклада от содержания ТМ в составе конденсата и растений вносят Zn и Cu, относящиеся к халькофильным элементам (по классификации В.М. Гольдшмид-

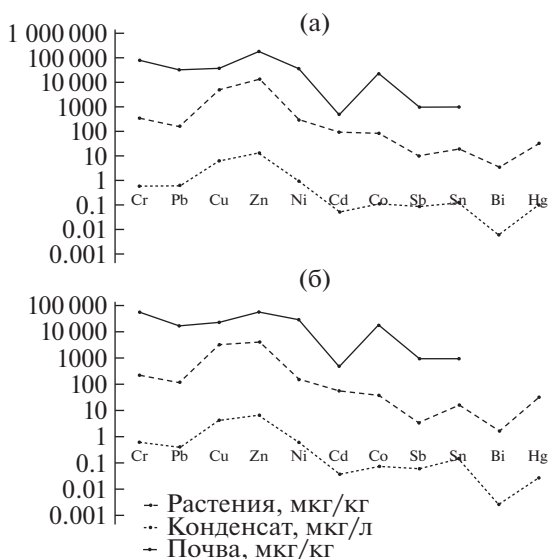


Рис. 2. Распределение ТМ в системе “почва — вода — растение” на: а — свалке, б — фоновом участке (п. Сотниково).

та). Вероятно, эти элементы обладают схожим механизмом поглощения корневой системой растений, что подтверждается многими исследованиями [8, 10, 13]. К ТМ, содержание которых в конденсате и растениях варьируется от 1 до 10%, относятся Cr, Ni, Pb, остальные элементы находятся в рассматриваемых средах в количестве <1%.

В почве же основными вкладчиками являются халькофильный Zn и литофильный Cr, суммарный вклад которых составляет >50%. К следующей группе можно отнести Ni, Cu, Co, Pb, их со-

держание в почве составляет >1%. К элементам, содержание которых в почве составляет <1%, относятся Sb, Sn, Cd.

В целом наблюдается корреляция между содержанием ТМ в почве, конденсате и растениях. Однако растения могут выступать не только пассивным рецептором микроэлементов (захватывая пыль и/или поглощая корнями), но и обладают способностью контролировать поступление или удаление некоторых элементов посредством соответствующих физиологических реакций. К примеру, в растениях, отобранных на всех исследуемых участках, наблюдается повышенная концентрация Cd, несмотря на его относительно низкое содержание в почве и конденсате, что наглядно видно при анализе геохимических рядов. Считается, что Cd не входит в число необходимых для растений элементов, однако он эффективно поглощается как корневой системой, так и листьями [13]. Поскольку растения легко извлекают Cd как из почвенных, так и из воздушных источников, его концентрация в них быстро возрастает в районах с повышенным загрязнением атмосферного воздуха, что характерно для всех исследуемых участков, так как они расположены в зоне влияния городской застройки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объекты размещения промышленных и бытовых отходов после закрытия продолжают оказывать значительное влияние на окружающую среду. Содержание тяжелых металлов во всех изучаемых средах, контактирующих со свалочным телом (почвы, растения, конденсат), превышает фоновые показатели, во многих случаях наблю-

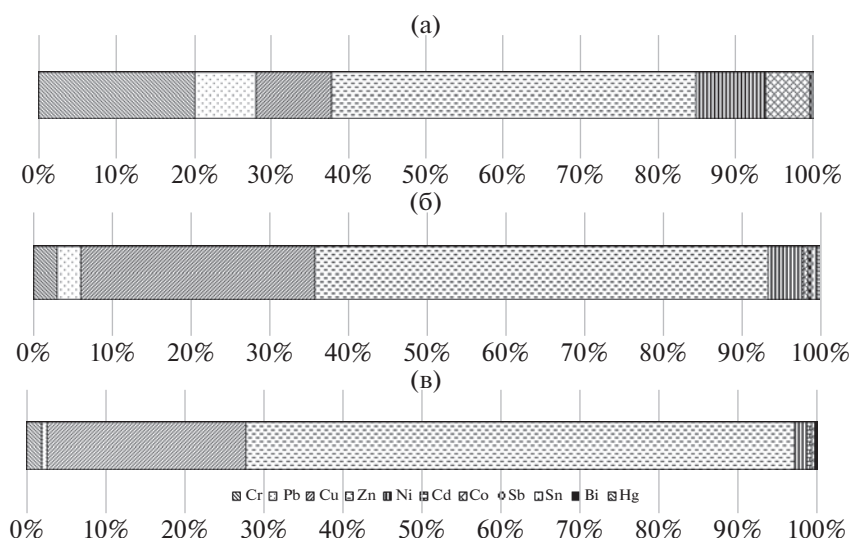


Рис. 3. Распределение тяжелых металлов в почве (а), конденсате (б) и растениях (в) на примере свалки п. Сотниково.

даются превышения норм предельно-допустимых концентраций и кларковых значений.

Степень загрязнения почв на объектах размещения отходов зависит от степени их рекультивации и варьируется от допустимого уровня загрязнения для частично рекультивированных свалок до чрезвычайно-опасной категории загрязнения для нереккультивированных объектов.

Суммарные показатели загрязнения почв, растений и конденсата позволили проранжировать изучаемые объекты размещения отходов по степени их влияния на окружающую среду. Учитывая работу барьерных механизмов растений при накоплении тяжелых металлов, рассмотренные объекты можно составить в следующий ряд по уменьшению степени загрязнения: п. Бабасанова > п. Сотниково > п. Стеклозавод > п. Площадка. Указанная последовательность может являться основанием для принятия решения о необходимости рекультивации нарушенных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П.* Полное собрание трудов в 18 т. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. Т. 4 / Е.М. Коробова (ред.) Л.Д. Виноградова (сост.). М.: РАН, 2021. 298 с.
2. *Гуман О.М.* Эколого-геологические условия полигонов твердых бытовых отходов среднего Урала: автореф. дис. докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2008. 43 с.
3. *Жалсараев Б.Ж., Кутовой А.Н., Цыгугев В.Г.* Рентгеновский спектрометр Пат. 2397481, РФ // Б.И. 2010. № 23. 9 с.
4. *Зайцева Т.А.* Закономерности изменения микро-биоценозов на полигонах депонирования твердых бытовых отходов в процессе деструкции органических веществ: автореф. дис. докт. биол. наук. Пермь: ПГУ, 2006. 36 с.
5. *Корсун О.В.* Природа Забайкалья: растения. Чита: Экспресс-издательство, 2009. 512 с.
6. *Куриленко В.В., Подлипский И.И., Осмоловская Н.Г.* Эколого-геологическая и биогеохимическая оценка воздействия полигонов бытовых отходов на состояние окружающей среды // Экология и промышленность России. 2012. № 11. С. 28–32.
7. *Реймерс Н.Ф.* Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. М.: Россия молодая, 1994. 366 с.
8. *Ринькис Г.Я.* Оптимизация минерального питания растений. Рига: Зинанте, 1972. 355 с.
9. *Филиппова Л.А., Юркова И.В.* Геохимическое влияние малых свалок на окружающую среду // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. № 1 (34). С. 92–106.
10. *Jarvis S.C., Robson A.D.* Absorption and Distribution of Copper in Plants with Sufficient or Deficient Supplies // *Annals of Botany*. 1982. V. 50, № 2. P. 151–160.
11. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. London, New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011. 505 p.
12. *Schiopu A.-M., Gavrilescu M.* Municipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2010. V. 9. № 7. P. 993–1019.
13. *Vavarkova M.D., Adamcova D., Zloch J., Radziemska M. et al.* Impact of municipal solid waste landfill on environment – a case study // *Journal of Ecological Engineering*. 2018. V. 19. Iss. 4. P. 55–68.

BEHAVIOR OF HEAVY METALS IN SOIL-CONDENSATE-PLANTS SYSTEM IN THE ULAN-UDE LANDFILLS

T. V. Cheredova^{a,b,#}, S. G. Doroshkevich^a, and S. V. Bartanova^a

^a*Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Sakhyanovoi, 6a, Ulan-Ude, 670047 Russia*

^b*East Siberian State University of Technology and Management, ul. Klyuchevskaya, 40b, Ulan-Ude, 670013 Russia*

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

The impact of waste dumps on environmental components, i.e., soil, evaporating soil water (condensate) and plants is studied. It has been revealed that industrial and municipal waste dumps continue to affect significantly the environment after their closure. The behavior of heavy metals (Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg, and Cr) in soils, plants, and condensate in landfill areas and beyond them (the background) has been studied in detail. It has been found out that soils, plants and condensate at landfills are enriched in heavy metals as compared to the background sites. The degree of soil contamination at waste dumps depends on the reclamation stage of the latter. The landfill soils exceed the norms of maximum permissible concentrations for heavy metals by 1.1–90 times. Concentrations of heavy metals in plants exceed the background values from 1.1 to 104 times at all dumps. The maximum level of heavy metals in plants is exceeded for Zn, Cd, Cr. In the condensate sampled at the dumps, MPC is exceeded for Cu, Zn, and Hg. Based on the analysis results, the geochemical rows of heavy metal distribution in different landfill environments were compiled: in plants – Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Co > Hg > Sn > Bi; in condensate – Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Sn > Co > Hg > Sb > Cd > Bi; in the soil – Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > Co > Sb = Sn > Cd. The distribution of heavy

metals in the condensate and plants is similar. In these environments, contribution of Zn and Cu is more than 80%, contribution of Cr, Ni, Pb varies from 1 to 10%; contribution of Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg is less than 1%. Heavy metals are distributed in soil according to a different pattern: the main contributors are Zn and Cr (their input is more than 50%), then go Ni, Cu, Co, and Pb (their content in soil varies from 1 to 50%), followed by Sb, Sn, and Cd (their content is less than 1%). Total pollution indices (Zc) of the soil, condensate and plants have been calculated for each landfill. Based on Zc, the landfills were grouped in a ranking series, which can form the basis for assigning the sequence of landfill reclamation measures.

Keywords: dumps, municipal and industrial waste, soil, plants, condensate

REFERENCES

1. Vinogradov, A.P. *Geokhimiia redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh. Polnoe sobranie trudov v 18 t. T. 4* [Geochemistry of rare and scattered elements in soils. The complete works in 18 volumes. Vol. 4.]. E.M. Korobova, L.D. Vinogradova, Eds. Moscow, RAS Publ., 2021, 298 p. (in Russian)
2. Guman, O.M. *Ekologo-geologicheskie usloviya polygonov tverdykh bytovykh otkhodov srednego Urala* [Ecological and geological conditions of solid waste landfills in the Middle Urals.]. Extended abstract of Doctoral (Geol.-Min.) disseration. Yekaterinburg, UGGU Publ., 2008, 43 p. (in Russian)
3. Zhalsaraev, B.Zh., Kutovoi, A.N., Tsynguev, V.G. *Rentgenovskii spektrometr* [X-ray spectrometer]. Patent RF, no. 2397481, 2010. (in Russian)
4. Zaitseva, T.A. *Zakonomernosti izmeneniya mikrobiotsenozov na polygonakh deponirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov v protsesse destruktii organicheskikh veshchestv* [Patterns of changes in microbiocenoses at landfills of solid household waste deposition in the process of destruction of organic substances]. Extended abstract of Doctoral (Biol.) disseration. Perm, PSU Publ., 2006, 36 p. (in Russian)
5. Korsun, O.V. *Priroda Zabaikal' ya: rasteniya* [Nature of Transbaikalia: plants]. Chita, Express Publ., 2009, 512 p. (in Russian)
6. Kurilenko, V.V., Podplinskii, I.I., Osmolovskaya, N.G. *Ekologo-geologicheskaya i bio-geokhimicheskaya otsenka vozdeistviya polygonov bytovykh otkhodov na sostoyanie okruzhayushchei sredy* [Ecological geological and bio-geochemical assessment of the impact of municipal solid waste landfills on the environment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2012, no. 11, pp. 28–32. (in Russian)
7. Reimers, N.F. *Ekologiya. Teorii, zakony, pravila, principy i gipotezy* [Ecology. Theories, laws, rules, principles and hypotheses]. Moscow, Rossiya molodaya Publ., 1994, 366 p. (in Russian)
8. Rin'kis, G.Ya. *Optimizatsiya mineral'nogo pitaniya rastenii* [Optimization of mineral nutrition of plants]. Riga, Zinante Publ., 1972, 355 p. (in Russian)
9. Filippova, L.A. Yurkova, I.V. *Geokhimicheskoe vliyanie malykh svalok na okruzhayushchuyu sredu* [Geochemical impact of small landfills on the environment]. *Izvestiya SO RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii*, 2009, no. 34, pp. 92–106. (in Russian)
10. Jarvis, S.C., Robson, A.D. Absorption and distribution of copper in plants with sufficient or deficient supplies. *Annals of Botany*, 1982, vol. 50, no. 2, pp. 151–160.
11. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. London, New York, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011, 505 p.
12. Schiopu, A.-M., Gavrilescu, M. Municipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2010, vol. 9, no. 7, pp. 993–1019.
13. Vaverkova, M.D., Adamcova, D., Zloch, J., Radziemska, M., et al. Impact of municipal solid waste landfill on environment — a case study. *Journal of Ecological Engineering*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 55–68.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.4

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЗАХОРОНЕННЫХ ПРОДУКТОВ МЕХАНИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТХОДОВ В ПОЛНОМАСШТАБНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

© 2023 г. Т. И. Юганова^{1,*}

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

*E-mail: tigryu@gmail.com

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 09.09.2022 г.

Принята к публикации 12.11.2022 г.

Рассмотрены полномасштабные эксперименты по выщелачиванию загрязняющих веществ из продуктов механико-биологической обработки твердых коммунальных отходов (ТКО), моделирующие захоронение на реальном полигоне. Это исследования в больших реакторах и в экспериментальной секции полигона ТКО, куда помещены стабилизированные отходы. Описываются результаты этих экспериментов и сравниваются с полученными в ходе различных лабораторных тестов. Даются рекомендации по усовершенствованию лабораторных тестов и прогнозных моделей.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, механико-биологическая обработка, стабилизированные отходы, выщелачивание, органическое вещество, тяжелые металлы, полномасштабные эксперименты

DOI: 10.31857/S0869780923010101, EDN: HSOWWU

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в европейских странах ключевую роль в управлении отходами играет механико-биологическая обработка отходов (МБО) посредством аэробного компостирования и/или анаэробного сбраживания. МБО позволяет наряду со сжиганием отходов или в качестве альтернативы сжиганию значительно уменьшить объем отходов, направляемых на захоронение, и, в частности, свести до минимума объем биологически реакционноспособных веществ в этом потоке. Процессы МБО, возможности использования стабилизированных отходов (СО), проблемы выщелачивания загрязняющих веществ из СО и допустимости захоронения СО на полигонах ТКО описаны ранее [1, 2].

Как правило, для оценки процесса выщелачивания отходов могут быть приняты два разных подхода: лабораторные эксперименты с объединением различных процедур тестирования (например, статические эксперименты или инфильтрационные тесты в колонках с восходящим потоком) или опробование на реальных полигонах. Реакторы-имитаторы полигонов позволяют лучше прогнозировать качество фильтрата в долгосрочной перспективе, чем лабораторные статические тесты [10]. Что касается натурных исследований на реальных полигонах, то пока нет данных

о производительности полигонов, заполненных только СО [16], и имеется лишь немного данных о полигонах, куда поступала различная доля СО [15].

Долгосрочное поведение СО на полигонах будет отличаться от поведения необработанных ТКО из-за удаления определенных фракций отходов во время механической обработки и частичного разложения во время биологической обработки. Знание о газообразовании и выщелачивании СО необходимо для оценки рисков, связанных с принимающими их полигонами, а также для их эффективного проектирования, эксплуатации и последующего обслуживания, включая системы управления газом и фильтратом [17]. Важно, чтобы исследователи создавали и тестировали новые модели и/или инструменты для оценки качества СО, чтобы определить, можно ли не направлять их на полигоны, и в то же время оценить производство фильтрата и биогаза на полигонах, которые будут получать только остатки от переработки отходов [11].

Настоящая статья посвящена полномасштабным экспериментам по выщелачиванию загрязняющих веществ (ЗВ) из СО, моделирующим захоронение на реальном полигоне. В России опыт МБО пока ограничен, поэтому рассматриваются зарубежные исследования в больших реакторах и

экспериментальной секции полигона ТКО, куда помещены СО.

Цель работы — проанализировать результаты этих экспериментов, в некоторых аспектах отличающиеся от полученных в лаборатории, дать рекомендации по усовершенствованию лабораторных тестов и прогнозных моделей.

ИССЛЕДОВАНИЯ В БОЛЬШИХ РЕАКТОРАХ

Устройство и функционирование реакторов

В исследованиях [16, 17] рассматривались два вида СО (с предприятий в Великобритании и Германии), прошедших различную обработку. Подготовка и состав этих СО описаны также в [1]. Так, в Великобритании отходы после механической обработки компостировались аэробно в принудительно вентилируемых валках с регулярным увлажнением и переворачиванием в полностью закрытых цехах в течение 6 нед. После обработки материал снова просеивался для извлечения любых оставшихся сухих материалов, пригодных к повторному использованию, в результате чего максимальный размер частиц остаточных СО составлял около 20 мм. В Германии отходы после механической обработки анаэробно сбрасывались в ферментационных танках в течение 3 нед. Сброженный материал извлекался и переносился в зону последующей аэробной обработки, где он разлагался дальше в закрытых валках в течение примерно 6 нед. Максимальный размер частиц остаточного материала составлял около 60 мм. Таким образом, СО из Германии образовывались после более продолжительной (около 9 нед) анаэробной и аэробной биологической обработки сырых ТКО по сравнению с 6-недельной аэробной биологической обработкой отходов из Великобритании и состояли из более крупных частиц.

Для изучения долгосрочного поведения СО на полигонах были использованы большие консолидирующие анаэробные реакторы (consolidating anaerobic reactors — CAR) путем моделирования анаэробных условий. Корпус каждого реактора CAR состоял из газонепроницаемого цилиндра из плексигласа диаметром 480 мм и высотой 900 мм. В основание реактора был уложен 100-сантиметровый слой гравия, перекрытый геотекстилем. Затем размещались примерно 40 кг СО, высушенных в печи при 70°C, слоями по 5 см до общей высоты 50 см. Еще один слой гравия толщиной 5 см был уложен на верхней поверхности отходов, покрытой геотекстилем. Каждый реактор CAR был оборудован системой рециркуляции фильтрата с перистальтическим насосом.

Контрольный реактор (CAR1) и тестовый реактор (CAR2) были полностью закрыты. Для регулирования потока газа и фильтрата были уста-

новлены соответствующие клапаны. Затем реакторы барботировались газообразным азотом для удаления кислорода. CAR2 был заполнен 80 л синтетического фильтрата, содержащего деионизированную воду, смешанную с минеральными питательными веществами и микроэлементами. Был добавлен инокулят анаэробно сброженного осадка с предприятия по очистке сточных вод, чтобы гарантировать присутствие жизнеспособных метаногенных бактерий и стимулировать метаногенез. В контрольный реактор (CAR1) добавлялись 80 л синтетического фильтрата, смешанного с уксусной и пропионовой кислотами в концентрации 10 г/л каждая, для подавления микробной активности и задержки метаногенеза. Фильтрат и отходы в CAR вновь барботировались газообразным азотом, и начиналась непрерывная рециркуляция фильтрата со скоростью 1.38 л/ч вниз через отходы. К СО в CAR прикладывалась постоянная вертикальная нагрузка 50 кПа, моделирующая анаэробные условия на глубине ~5 м на полигоне ТКО. В каждом реакторе поддерживалась постоянная температура около 30°C с помощью тепловой подушки. Эксплуатация в таком режиме продолжалась 347 и 279 сут для CAR1 и CAR2 соответственно. CAR1 работал при ~20°C в комнате с управляемой температурой, а CAR2 поддерживался при постоянной мезофильной температуре 30°C для создания благоприятной среды для роста микроорганизмов. Объем и состав биогаза и качество фильтрата отслеживались на регулярной основе, чтобы понимать степень стабилизации отходов.

Образцы фильтрата анализировались на pH, электрическую проводимость (ЭП), окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), содержание общего органического углерода (ООУ), летучих жирных кислот (ЛЖК), аммонийного азота (NH₄-N).

На том же аппарате CAR2 в течение 919 сут проводились эксперименты со свежими ТКО из того же источника в Великобритании [7]. Рассматривались изменения характеристик фильтрата с продолжительностью МБО.

ОВП, pH, ЛЖК, производство биогаза

Изменения ОВП фильтрата в CAR2 показывают, что на ранней стадии создались восстановительные условия: ОВП резко снижается между началом компостирования и тридцатыми сутками примерно от –200 до –300 мВ. Последнее является оптимальным для метаногенеза.

Производство биогаза и pH фильтрата, содержание ЛЖК и углерода — индикаторы возникновения и развития биоразложения. Данные, иллюстрирующие изменение во времени общего количества pH фильтрата и общего содержания ЛЖК,

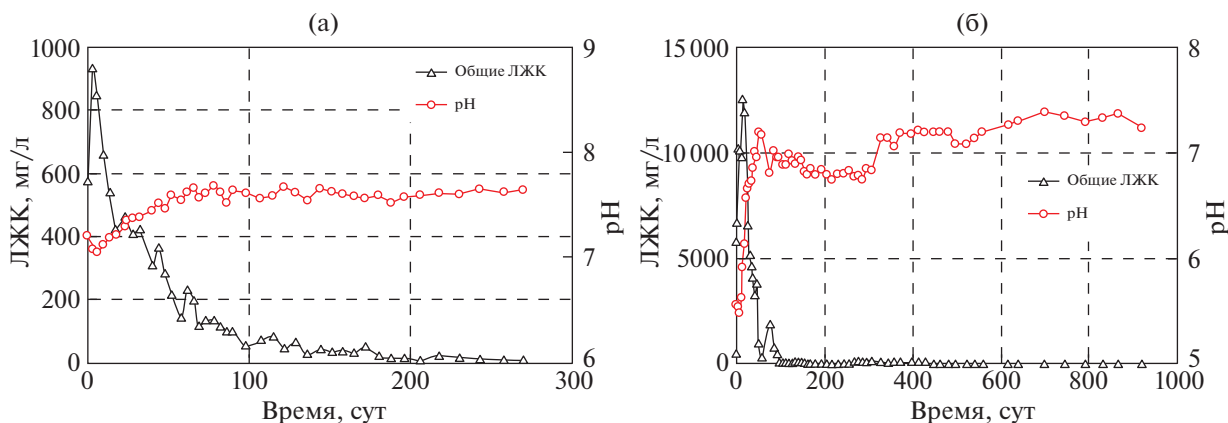


Рис. 1. ЛЖК в фильтрате и pH для: (а) – СО [17], (б) – свежих ТКО [7] из Великобритании.

показаны на рис. 1а для отходов СО Великобритании. После первой недели производство биогаза начало увеличиваться, а концентрации ЛЖК и ООУ в фильтрате стали падать, т.е. начинался метаногенез. Сравнительные данные для свежих ТКО [7] представлены на рис. 1б. Очень короткая ацидогенная стадия для СО по сравнению с 40 сут, наблюдавшимися для свежих ТКО в [7], согласуется с разложением органических соединений во время МБО.

Окончательные стабильные значения pH составляли от 7.5 до 7.7 (см. рис. 1б). Низкие конечные концентрации ЛЖК указывают на то, что большая часть доступного органического вещества была преобразована в биогаз, и была достигнута биологическая стабилизация.

Органический углерод в фильтрате

Органическая нагрузка фильтрата была проанализирована с позиций содержания ООУ. Оно увеличилось в течение первой недели в результате быстрой деградации и гидролиза органических веществ из отходов на начальной короткой ацидогенной стадии. После наступления метаногенных условий содержание ООУ начало медленно снижаться в результате процессов биodeградации и гумификации органического вещества и стало стабильным к концу эксперимента на уровне примерно 650 и 290 мг/л для СО Великобритании и Германии соответственно. Этот ООУ в основном устойчивый – по-видимому, гуминовые и фульвокислоты, как предполагали авторы [9]. Органическая нагрузка фильтрата из СО Германии была низкой по сравнению с таковой из СО Великобритании, что согласуется с меньшим содержанием органических веществ в СО Германии из-за различных шагов биологической обработки.

Значения ООУ и РОУ были очень близкими, что указывает на то, что большая часть органического углерода в фильтрате была растворена.

Первоначальное повышение концентрации неорганического углерода (НОУ) в фильтрате, вероятно, связано с преобразованием углерода в неорганические формы, такие как гидрокарбонаты и карбонаты. Последующее снижение НОУ происходит из-за осаждения карбонатов кальция и магния.

Более низкое содержание органических веществ в фильтратах СО по сравнению со свежими ТКО, согласуется с выводами авторов [15], но эти значения превышают наблюдавшиеся в исследовании [18]. ООУ фильтрата в СО Германии был меньше, чем в СО Великобритании, что согласуется с меньшим исходным содержанием органических веществ в результате более тщательной предварительной биологической обработки.

Данные [7] для свежих ТКО по ООУ подтверждают эффективность предварительной обработки в снижении содержания ООУ в фильтрате, как на начальном этапе, так и после стабилизации. Следовательно, такая обработка может быть полезной для снижения не только первоначального, но и долгосрочного потенциала загрязнения отходов на полигоне.

Аммонийный и общий азот

На рис. 2 показаны концентрации общего (ОА) и аммонийного ($\text{NH}_4\text{-N}$) азота в фильтратах из двух образцов СО. Общий азот в принципе представляет собой сумму нитрита, нитрата, аммонийного и органического азота. Поскольку ожидается, что в анаэробных условиях и при отрицательном ОВП уровни нитритного и нитратного азота будут низкими, общий азот в этом случае будет состоять в основном из аммонийного и органического азота. Поэтому тенденция ОА была такой же, как и для аммонийного азота.

Концентрации как ОА, так и $\text{NH}_4\text{-N}$ увеличивались со временем, в отличие от снижения ООУ. Первоначальное резкое увеличение ОА и $\text{NH}_4\text{-N}$

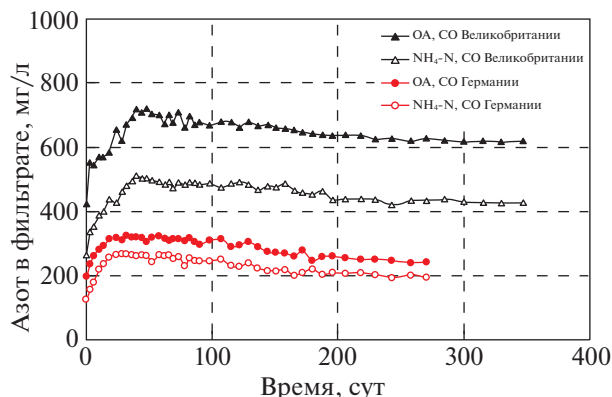


Рис. 2. Азот в фильтрате для СО Великобритании и Германии [17].

можно объяснить прямым вымыванием аммония из отходов и микробиальным разложением азотистых органических соединений, включая белки и аминокислоты.

После начального увеличения значения ОА и NH₄-N оставались стабильными в течение определенного периода. Затем концентрация аммонийного азота очень медленно снижалась до стабильных значений примерно 425 мг/л и 195 мг/л для СО Великобритании и Германии соответственно. Возможные объяснения: сорбция на массе отходов; анаэробное окисление аммония (анаммокс) и преобразование в газообразный азот; микробное поглощение для роста новых клеток; формирование вторичного минерала, например, струвита¹ [17].

Потенциал выщелачивания азота из СО Германии меньше, чем из СО Великобритании, вероятно, в результате более низкого общего содержания азота в самих отходах.

На рис. 3 сравниваются нагрузки фильтрата по аммонийному азоту, измеренные в исследовании СО [17], с данными, полученными в [7] для свежих ТКО (данные пересчитаны на массу СО).

Концентрации аммония, измеренные в фильтрате из свежих ТКО, были не только значительно выше, но также заметно увеличивались со временем в отличие от постепенного снижения в СО. (Резкое увеличение концентрации аммонийного азота сразу после 600 сут было объяснено в [7] гибелью/лизисом² бактериальной биомассы.) Преимущества предварительной обработки отходов в снижении нагрузки фильтрата аммонийным азотом очевидны, при этом наиболее тщательно обработанные отходы демонстрируют наименьшие начальные и остаточные потенциальные нагрузки загрязнения.

¹ Струвит — биогенный минерал, водный фосфат аммония и магния.

² Лизис — растворение клеток и их систем, в том числе микроорганизмов, под влиянием различных агентов.

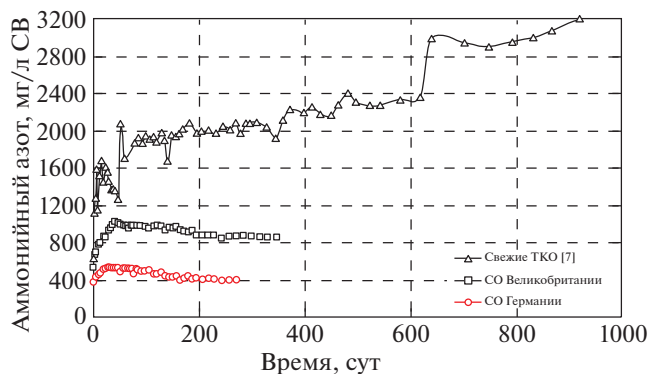


Рис. 3. Нагрузка NH₄-N в свежих ТКО и СО [17].

Тяжелые металлы

Образцы фильтратов СО Великобритании и Германии были проанализированы на шесть ТМ: цинк (Zn), никель (Ni), медь (Cu), хром (Cr), кадмий (Cd) и свинец (Pb). После начала метаногенеза концентрации металлов имели тенденцию к снижению из-за формирования сильно восстановительной среды (низкий ОВР). Произошло значительное уменьшение концентраций всех металлов, кроме Cr и Cd. Переход ТМ в неподвижное состояние из растворенной фазы завершался примерно через 50 сут, и затем концентрации оставались относительно постоянными до конца эксперимента. Возможные процессы истощения или удерживания металлов: образование нерастворимых осадков (в основном сульфидов или карбонатов) и сорбция отходами и взвешенными твердыми частицами. Концентрации ТМ в фильтрате из СО Германии были ниже, чем из СО Великобритании. В целом низкие концентрации ТМ согласуются с результатами других исследований [15, 18].

Средние концентрации ТМ, полученные ранее для фильтрата из свежих ТКО, составили 1.2, 0.45, 0.19, 0.15 и 0.003 мг/л для Zn, Cu, Ni, Pb и Cd соответственно, что выше, чем для предварительно обработанных отходов. МБО могла либо понизить содержание металла в отходах, либо сделать его менее подвижным [17].

Анализ массового баланса углерода и азота

Количество углерода в системе в начале и в конце каждого эксперимента определялось на основе определения общего содержания углерода (измеряется непосредственно в массе на 1 кг сухого вещества (СВ)) и содержаний ООУ и НОУ в фильтрате (измеряется в массе на единицу объема фильтрата и умножается на объем фильтрата на 1 кг исходного СВ).

Во время эксперимента углерод выходил из системы отходы—фильтрат в выделившемся био-

Таблица 1. Сводный баланс углерода [17]

Локализация		Определенная форма	СО Великобритании, г/кг СВ	СО Германии, г/кг СВ
Углерод изначально в системе	Углерод в исходных СО	Определенный как ОУ в исходных СО	226.8	198.5
	Углерод в синтетическом фильтрате	$[(\text{Определенный ООУ} + \text{определенный НОУ}) \times \text{общий объем фильтрата в CAR}] / \text{ИМ}^*$	1.0	0.8
Углерод, удаленный из системы	Углерод в метане	$[\text{Общий объем произведенного биогаза} \times \text{объемная доля } \text{CH}_4 \times \text{доля общего объема, приписанная углероду}] / \text{ИМ}$	16.2	5.4
	Углерод в диоксиде углерода	$[\text{Общий объем произведенного биогаза} \times \text{объемная доля } \text{CO}_2 \times \text{доля общего объема, приписанная углероду}] / \text{ИМ}$	9.5	3.6
Углерод, оставшийся в системе	Углерод в фильтрате	$[(\text{Определенный ООУ} + \text{определенный НОУ}) \times \text{общий объем фильтрата в CAR}] / \text{ИМ}$	2.5	1.6
	Углерод в деградировавших СО	$[\text{Определенный ООУ} \times \text{конечная сухая масса СО в CAR}] / \text{ИМ}$	195.1	182.9
	Углерод, осажденный как карбонат кальция	$[\text{Изменения концентрации кальция в фильтрате} \times \text{общий объем фильтрата в CAR} \times \text{доля общей массы, приписанная углероду}] / \text{ИМ}$	0.6	0.3
	Углерод, осажденный как карбонат магния	$[\text{Изменения концентрации магния в фильтрате} \times \text{общий объем фильтрата в CAR} \times \text{доля общей массы, приписанная углероду}] / \text{ИМ}$	0.04	0.1
Ошибка баланса массы, %			1.7	2.7

* ИМ — исходная сухая масса СО в CAR.

газе (CO_2 и CH_4), а карбонаты кальция и магния (CaCO_3 и MgCO_3) осаждались. Потери углерода в виде метана и диоксида углерода рассчитывались из объема произведенного биогаза и объемных концентраций CH_4 и CO_2 , нормированных на 1 кг исходного СВ. Потеря углерода из-за карбонатных осадков оценивалась по снижению концентраций кальция и магния во время эксперимента, как объяснено в [8].

Расчеты баланса массы углерода приведены в табл. 1. Из углерода, первоначально присутствовавшего в СО Великобритании, всего 11% было удалено с биогазом (около 7% в виде метана и 4% в виде диоксида углерода) и менее 1% было перенесено в фильтрат. Для СО Германии 92% изначально присутствующего углерода осталось в СО, около 5% потеряно с биогазом (3% метана и 2% диоксида углерода) и менее 0.5% с фильтратом.

Небольшие количества неучтенного углерода могли отложиться в виде карбонатов (кальцит, сидерит и т.д.) или биомассы в дренажном слое, или могли быть просто кумулятивным результатом небольших потерь во время опробования и/или ошибок масштабирования выборки.

Для свежих ТКО в [8] показано, что около 70% исходного углерода осталось в остаточных отходах, 26% выделилось в виде биогаза и 1% — в

фильтрат после разложения в течение 919 сут. Конечное содержание углерода в СО после завершения разложения составляло 195.1 и 182.9 г/кг исходного СВ для СО Великобритании и Германии соответственно, что ниже значений сразу после МБО, составляющих 226.8 и 198.5 г/кг СВ соответственно. Их можно сравнить со значениями для свежих ТКО, равными 460.5 г/кг СВ в исходном состоянии и 318.9 г/кг СВ после полного разложения [8]. Это означает, что предварительная обработка ТКО приведет к удалению большего количества углерода, чем оставление его для разложения в относительно неконтролируемой среде полигона, а остаточная нагрузка углерода составит 57–63% от содержания в необработанных ТКО.

Относительно азота система по существу замкнута. Расчеты массового баланса азота для СО Великобритании и Германии суммированы в табл. 2. В первом случае 88% азота осталось в отходах в конце разложения, 6% перешло в фильтрат, при этом 6% не было учтено. Для СО Германии 93% азота осталось в отходах, 2% перешло в фильтрат, и 5% не было учтено. Неучтенный азот, вероятно, был утерян с газом и, возможно, из-за поглощения микробами или осаждения струвита в дренажном слое.

Таблица 2. Сводный баланс азота [17]

Локализация		Определенная форма	СО Великобритани, г/кг СВ	СО Германии, г/кг СВ
Азот изначально в системе	Азот в исходных СО	Определенный ОА в исходных СО	18.1	15.2
	Азот в синтетическом фильтрате	[Определенный ОА × общий объем фильтрата в CAR] / исходная сухая масса СО в CAR	0.2	0.1
Азот, оставшийся в системе	Азот в деградировавших СО	[Определенный ОА × конечная сухая масса СО в CAR] / исходная сухая масса СО в CAR	15.9	14.1
	Азот в фильтрате	[Определенный ОА × общий объем фильтрата в CAR] / исходная сухая масса СО в CAR	1.24	0.5
Ошибка баланса массы, %			6.3	4.9

ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СЕКЦИИ ПОЛИГОНА ТКО

Некоторые авторы наблюдали ограниченность лабораторных тестов биоразлагаемых отходов и предположили, что лучший вариант для оценки выщелачивания ЗВ на полигоне — это опробование *in situ*. Однако следует учитывать, что при тесте *in situ* необходимо в течение длительного периода времени принимать меры для определения характеристик фильтрата, образующегося при различных метеоусловиях и степенях разложения, поскольку результаты должны быть репрезентативными для всего полигона. Это существенно увеличивает стоимость метода и затрудняет экстраполяцию выводов из одних случаев на другие [13].

Устройство и функционирование экспериментальной секции

Инфильтрация СО в натурных условиях изучалась в [12]. Для этого была построена экспериментальная секция полигона ТКО. Она была расположена в углубленной области на поверхности бывшего полигона Meruelo в Испании и изолирована в соответствии с Council Directive 1999/31/ЕС [6]. Размещенный материал был полностью отделен от ранее захороненных отходов с помощью двух слоев глины и двух геомембран из полиэтилена высокой плотности, а затем дренажного слоя гравия, за которым следовал геотекстиль. Система операций включала складирование уплотненных СО слоями общей высотой около 4 м с промежуточными 30-сантиметровыми слоями глины. В дополнение к нижнему дренажному слою из 50 см гравия и сборным трубам в каждом слое СО размещалась дендритная дренажная сеть. Фильтрат, собранный со всех слоев на различных этапах работы полигона, направлялся в регулирующие резервуары, а затем на обработку. Площадь экспериментальной секции

составляла 30 × 30 м². Секция заполнялась отходами, поступающими непосредственно со стадии рафинирования (после биостабилизации) предприятия МБО, пока не достигла высоты 4 м. Мониторинг секции длился 18 мес (535 сут). Он включал: сбор и анализ данных приборов один раз в неделю; ежемесячное опробование и лабораторные анализы фильтрата, отобранного в точке отбора образцов, стоков и газа, собранного в пробоотборниках внутри секции.

Первая стадия обработки включала отделение повторно используемых материалов и материалов с высокой теплотворной способностью, которые валоризовались на дополнительной установке по утилизации энергии. Затем оставшаяся фракция размером менее 90 мм, отделенная с помощью барабанной дробилки, биологически стабилизировалась на крытом складе, где она механически переворачивалась один раз в неделю в течение 8 нед. Добавление воды или других компонентов не применялось.

После аэробной стабилизации неочищенный компостоподобный материал подвергался процессу дополнительного извлечения горючей фракции (>42 мм) с помощью барабанной дробилки. Оставшаяся фракция размером <42 мм проходила процесс рафинирования, который заключался в просеивании частиц до 15 мм, отделении частиц тяжелых материалов (керамика, стекло и инертный материал) и удалении легкой фракции (пластмассы). Компостоподобный материал хранился до его использования в качестве почвоулучшителя, тогда как остатки от рафинирования (примерно 40% от общего количества материала, депонированного на полигоне) предназначались для окончательного захоронения на свалке.

В экспериментальную секцию полигона Meruelo были загружены 4966 т таких СО с общей влажностью 30%. Плотность в сухом состоянии составила 967 кг/м³. В течение 18 мес было зарегистрировано 2108 мм осадков и примерно 422 мм

фильтрата (общий объем 379 м³, в среднем 709 л/сут). Учитывая весь вес захороненных отходов, в конце периода мониторинга было получено отношение жидкой и твердой фаз $L/S = 0.11$ л/кг.

Состав СО в экспериментальной секции показан в табл. 3. Видно, что почти 10% отходов были классифицированы как неидентифицируемые. В эту категорию входят инертные, а также био-разлагаемые материалы.

Состав фильтрата в сравнении с другими исследованиями

В табл. 4 показаны: диапазоны изменения параметров фильтрата на протяжении всего исследования в экспериментальной секции; результаты, достигнутые для всего фильтрата, собранного на полигоне Meruelo; результаты, полученные на “обычных” молодых (кислотная фаза) и старых (метаногенная фаза) полигонах ТКО, а также на нескольких других полигонах разного возраста [5]; диапазоны значений для СО с различной степенью предварительной обработки компостированием [15].

Определенные работы [12] концентрации металлов (см. табл. 4) выше, чем в других исследованиях. Особенно выделяются достигнутые в экспериментальной секции концентрации ТМ меди (Cu), цинка (Zn) и никеля (Ni). В своей работе по выщелачиванию металлов из СО в лабораторных колонках авторы [14] получили максимальное высвобождение (для $L/S = 10$ л/кг) 70, 6, 45 и 2.5 мг/кг СВ для Fe, Cu, Zn и Ni соответственно.

Значения, указанные в [12] для перечисленных металлов – 1.52, 0.20, 0.43 и 0.18 мг/кг СВ, – намного ниже значений [14] и значений, полученных для $L/S = 0.1$ л/кг. Эти различия можно объяснить тем фактом, что отходы, изученные в [14], подвергались более короткой, хотя и более интенсивной обработке (28 сут с принудительной аэрацией, поливом и ежедневным переворачиванием), а также влиянием pH, причем значение pH слабокислое, что увеличивает растворимость металлов по сравнению с исследованием [12].

Эволюция компонентов фильтрата

После первых 9 мес концентрация многих загрязняющих веществ в секции снизилась до менее одной трети от первоначального значения, демонстрируя, таким образом, эффект вымывания. Снижение более заметно для органических компонентов (рис. 4а, б), что является результатом активного разложения. Измеренные значения ХПК (72000 мг О₂/л), ООУ (27000 мг/л) и БПК (16000 мг О₂/л) изначально превышают диапазоны для отходов с предварительной обработкой со степенью компостирования от низкой до средней, с максимальными значениями 5000,

Таблица 3. Состав СО в экспериментальной секции [12]

Компонент	Доля в сухом веществе, %
Жесткая пластмасса	0.8
Гибкая пластмасса	3.3
Бумага и картон *	12.1
Текстиль	1.3
Древесина	4.1
Скорлупа и семена	7.0
Кости	2.0
Металлы	1.5
Стекло	51.5
Камни и керамика	6.6
Неидентифицируемые >4 мм	3.1
Неидентифицируемые <4 мм	6.7
Всего	100

* Выделены частично биоразлагаемые материалы.

2000 и 200 мг О₂/л соответственно (см. табл. 4). Эти параметры остаются на высоком уровне и даже увеличиваются в течение первых недель, а затем резко снижаются, когда начинает преобладать метаногенез. Это приводит к снижению концентраций БПК за период мониторинга на два порядка с окончательными значениями 200 мг О₂/л. Видимо, стабильная фаза еще не была достигнута [12].

Концентрации ООУ совпадают с теми, которые были получены в [14] для низких значений L/S в тестах СО. В экспериментальный период в [12] высвобожденный ООУ (857 мг/кг СВ) находится в пределах диапазона, обнаруженного другими авторами для аналогичных отношений L/S на обычном полигоне во время ацидогенной фазы.

Аммонийный азот, несмотря на первоначальное уменьшение (см. рис. 4в), поддерживает концентрации выше значений, полученных другими авторами. Например, в [15] были определены аналогичные концентрации на свалках со свежим органическим веществом, но более низкие значения NH₄-N (от 50 до 1000 мг/л) установлены в фильтрате из отходов, подвергнутых предварительной слабоинтенсивной аэробной обработке.

Для аммонийного азота в экспериментальной секции [12] наблюдалось несколько меньшее падение, чем для БПК. Это может быть результатом более медленного высвобождения NH₄-N в сочетании с его устойчивостью в фильтрате, поскольку, в отличие от углеродсодержащего материала, азот не превращается в биогаз. С другой стороны, одним из ожидаемых преимуществ предварительной биологической обработки отходов является

Таблица 4. Результаты оценки качества фильтрата в экспериментальной секции в сравнении со значениями, опубликованными в литературе для различных полигонов и для СО разной степени обработки [12]

Параметр	Единица	Экспериментальная секция ^а (17 образцов)	Полигон Metcalf ^а (17 образцов)	[5]			[15]	
				Кислотная фаза	Метаногенная фаза	Различный возраст	СО высокой степени компостирования ^б	СО от низкой до средней степени компостирования ^б
рН		7.9–9.6 (8.9)	7.4–8.6 (8.0)	4.5–7.5	7.5–9	4.5–9	7.5–8	7.5–8.5
Проводимость	мкСм/см	31.5–67.8 (46.8)	6.6–22.3 (13.7)			2500–35 000	6–10	10–20
Общая ХПК	мг O ₂ /л	10 833–79 478 (29 981)	1037–11 013 (2894)					
ХПК в растворе	мг O ₂ /л	9943–72 912 (25 858)	843–10 771 (2535)	6000–60000	500–4500	140–152 000	2000–1500	1000–5000
Общая БПК ₅	мг O ₂ /л	850–20 400 (6700)	160–4400 (984)					
БПК ₅ в растворе	мг O ₂ /л	200–16 000 (5100)	120–2900 (722)	4000–40 000	20–550	20–57 000	50–30	20–200
ООУ в растворе	мг/л	2736–27 395 (8560)	263–5151 (970)			30–29 000	500–500	500–2000
NH ₄ -N	мг/л	1378–5600 (3420)	323–1230 (667)			50–2200	30–200	50–1000
Сульфат (как SO ₄)	мг/л	88–2179 (937)	57–332 (150)	70–1750	10–420	8–7750	500–500	1000–5000
Общие твердые	мг/л	22 258–138 706 (46 100)	4010–13 770 (7238)			2000–60 000		
Кальций	мг/л	9–917 (180)	83–287 (147)	10–2500	20–600	10–7200	250–300	100–800
Натрий	мг/л	3485–7043 (5326)	612–2600 (1407)			70–7700	800–1200	2000–4000
Магний	мг/л	38–793 (163)	43–131 (69)	50–1150	40–350	30–15 000	60–100	100–400
Железо	мг/л	7–40 (16)	2–11 (3)			3–5500	2–10	5–20
Хром	мкг/л	209–1180 (746)	<44–259 (156)			20–1500	50–100	100–500
Кадмий	мкг/л	4–287 (55)	<1–21 (11)			0.1–400	3–3	5–100
Медь	мкг/л	747–10 422 (2140)	52–238 (115)			5–10 000	200–200	200–500
Цинк	мкг/л	1500–18 584 (4083)	104–4794 (615)	100–120 000	30–4000	30–1 000 000	500–200	500–3000
Свинец	мкг/л	88–1626 (437)	<8–231 (63)			1–5000	20–40	100–400
Никель	мкг/л	88–3331 (1582)	77–460 (198)			15–13 000	100–100	100–700
Мышьяк	мкг/л	290–630 (463)	26–110 (61)			10–1000	4–6	10–100
Ртуть	мкг/л	0.9–5.0 (1.8)	<0.5–0.8 (<0.5)			0.1–160	0.1–0.1	0.1–10

^а В скобках указано среднее значение, найденное для каждого параметра (по-видимому, медиана).
^б Первое число соответствует начальному значению, обычно до 2–3 лет. Второе число относится к более поздним измерениям.

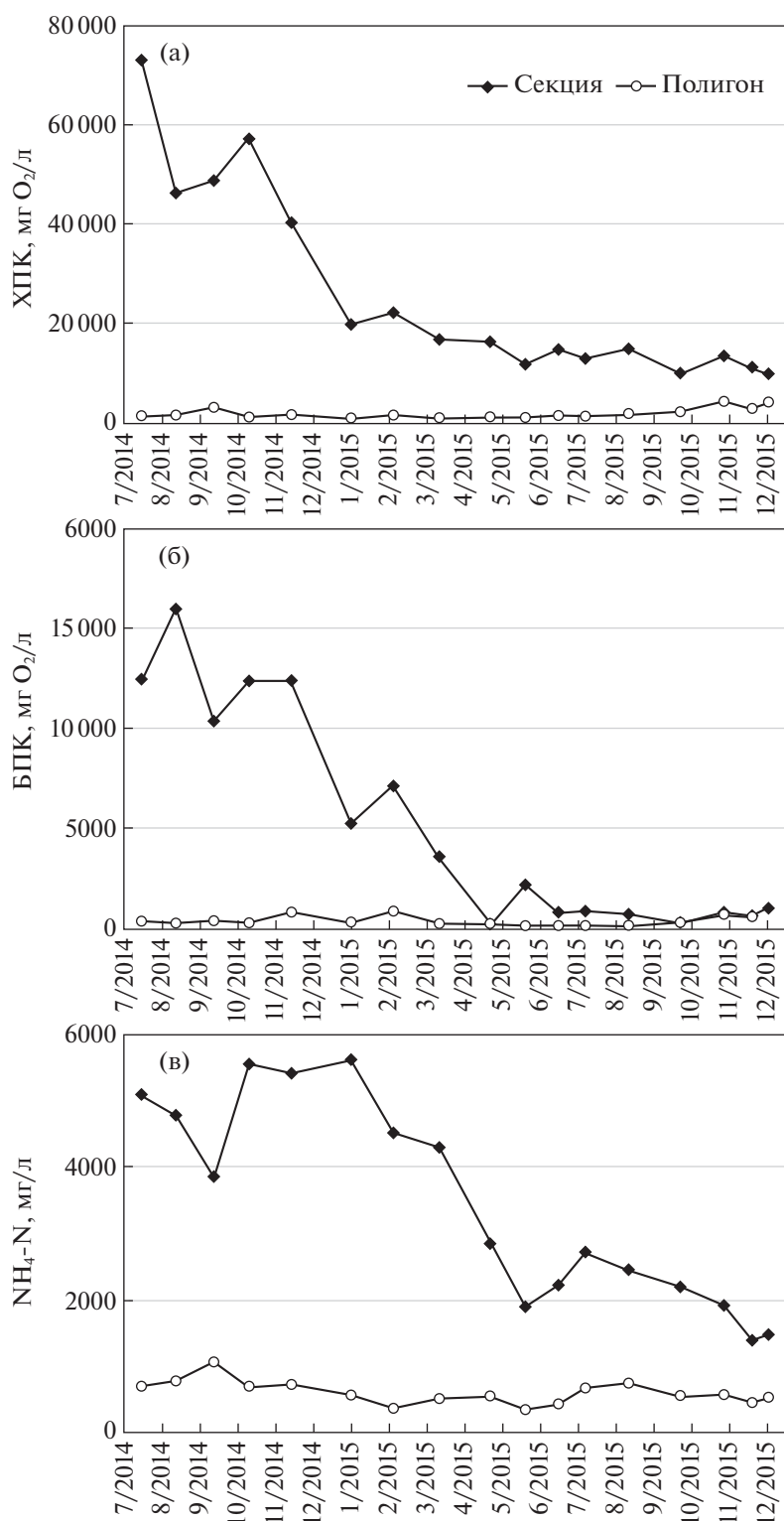


Рис. 4. Эволюция ХПК (а), БПК (б) и NH₄-N (в) в фильтрате [12].

снижение нагрузки азотного загрязнения на полигонах [16].

Основной причиной высоких концентраций аммония, отмеченных в начале мониторинга секции в [12], может быть аммонификация органи-

ческого азота на предприятии МБО, в результате чего остается доступным большое количество NH₄-N. Поскольку отходы еще не подвергаются процессу созревания, который способствовал бы их деградации (с образованием нитрат-иона),

аммонийный азот высвобождается с момента их захоронения. Авторы [16] в лабораторном исследовании наблюдали аналогичный эффект, т.е. быстрое высвобождение иона аммония, но они получили концентрации $\text{NH}_4\text{-N}$ лишь немного выше 1000 мг/л в наименее стабилизированных отходах. Однако, хотя отношение $L/S = 2$ л/кг было выше, чем в [12] (0.11 л/кг), количество азота, выделенного в экспериментах [16], — 850 и 390 мг/кг СВ для каждого из предварительно механико-биологически обработанных образцов отходов, близко к полученным в [12] — 420 мг/кг СВ.

Следует отметить, что фильтрат из секции имеет значительно более высокие концентрации ЗВ, чем фильтрат с полигона, на котором она расположена (см. табл. 4). Причина этого двоякая. Во-первых, полигон имеет гораздо большую площадь, подвергаемую дождям, что способствует большему разбавлению фильтрата. Кроме того, полигон старше секции, поскольку он начал работу в 2011 г., и поэтому отходы, которые также включают необработанную фракцию обычных городских ТКО, прошли более длительный процесс стабилизации. Средние концентрации различных неорганических параметров в фильтрате полигона остаются в пределах от 10 до 30% от значений, измеренных в фильтрате секции.

Исключения: Са, средняя концентрация которого в фильтре свалки составляет 80% от концентрации в фильтрате секции (147 против 180 мг/л), и Си с концентрацией 5% от концентрации фильтрата из секции (0.12 против 2.14 мг/л). Небольшое различие в концентрациях Са объясняется влиянием pH на его растворимость. Снижение растворимости Са значительно больше в фильтрате секции, так как были определены значения pH выше 9, по сравнению с максимальным значением 8.6 в фильтрате полигона.

С другой стороны, Си — один из металлов, на который больше всего влияют процессы комплексообразования с органическими соединениями. Кроме того, комплексообразование Си резко возрастает с увеличением pH, что приводит к максимальной общей скорости миграции Си при высоких значениях pH [5]. Этим можно объяснить большое различие между концентрациями Си в фильтратах секции и полигона, поскольку значительных различий в отношении содержания Си в твердой фазе не было выявлено.

Для органического вещества (ХПК, БПК) различие между средними значениями в фильтратах из секции и с полигона больше. Как видно на рис. 4а, б, в течение первых месяцев разложения значения ХПК и БПК в секции очень высоки, но они сразу же снижаются до значений, аналогичных этим показателям на всем полигоне. Это свидетельствует о быстрой начальной стабилизации органических отходов.

Таким образом, СО в секции вносят свой вклад в загрязнение фильтрата так же, как и остальная часть полигона, и показывают возможное влияние pH, поскольку он, по-видимому, изменяет состав и концентрацию фильтрата [12].

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ РАЗЛИЧНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ТЕСТОВ И В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СЕКЦИИ ПОЛИГОНА

Результаты, полученные в описанной выше экспериментальной секции полигона [12], были сопоставлены с данными трех лабораторных тестов для тех же СО: один статический тест выщелачивания и два типа тестов с колонкой [13].

Использованные лабораторные тесты

Статические тесты выщелачивания проводились на образцах отходов, взятых с указанного выше предприятия МБО и подготовленных с включением только биоразлагаемых материалов (бумаги и картона, текстиля, древесины, костей, скорлупы и семян, а также смешанного биоразлагаемого материала), в той же пропорции, в которой они присутствуют в исследуемых отходах (остатки от процесса рафинирования компостоподобного материала). Размер частиц приблизительно 100 г образца был уменьшен до менее 4 мм и смешан с 1000 мл деионизированной воды в герметичном пластиковом контейнере ($L/S = 10$ л/кг). После разделения твердой и жидкой фаз были определены различные параметры фильтрата.

В инфильтрационных тестах использовались колонки двух размеров: малые (А, В, С, D) — с диаметром 80 мм и высотой 200 мм, и средняя — с диаметром 200 мм и высотой 800 мм. Все они были протестированы в соответствии со стандартом CEN/TS 14405 [4] для инфильтрационных тестов с восходящим потоком в режиме насыщения. В соответствии с требованиями стандарта были подготовлены образцы двух типов. В первом случае отходы просеивались с помощью сита с размером шага 8 мм, и просеянные (“мелочь”) переносились в колонки А и В. Во втором случае материал размером < 8 мм был смешан с фракцией более 8 мм, материал которой измельчали ножницами, чтобы уменьшить размер фрагментов до менее 8 мм. Этот смешанный материал был изучен в колонках С и D. Средняя колонка заполнялась отходами напрямую без специальной подготовки, весь материал имел размер менее 30 мм.

После заполнения колонки насыщались дистиллированной водой и оставлялись в покое на 3 сут, чтобы установить условия равновесия по всей их высоте. Затем насос снова запускался так,

Таблица 5. Высвобождение ЗВ в колонках при отношении $L/S \approx 10$ л/кг [13]

Параметр	Малые колонки А–В	Малые колонки С–D	Средняя колонка	Статический тест выщелачивания
L/S , л/кг	9.97	10.22	8.45	10
pH	6.16–6.89	6.27–7.45	6.34 – 6.90	6.90
ЭП, мСм/см	0.41–18.96	0.42–16.92	1.41–18.12	–
ООУ, мг/г СВ	36.15 ± 0.38	21.00 ± 0.55	8.72	27.2
ОА, мг/г СВ	3.65 ± 0.24	2.50 ± 0.12	1.12	2.52
Ca, мг/кг СВ	–	–	2697	2462
Cd, мг/кг СВ	0.08 ± 0.003	–	0.09	0.06
Cr, мг/кг СВ	0.55 ± 0.025	–	0.24	<0.26
Cu, мг/кг СВ	10.83 ± 1.68	5.52 ± 0.27	0.39	2.01
Fe, мг/кг СВ	44.38 ± 6.90	37.39 ± 4.18	47.37	–
K, мг/кг СВ	–	3868 ± 61	934	–
Mg, мг/кг СВ	1161 ± 299	563 ± 26	239	–
Na, мг/кг СВ	4681 ± 163	2652 ± 291	1066	1805
Ni, мг/кг СВ	4.44 ± 0.02	3.67 ± 0.35	0.87	1.03
Zn, мг/кг СВ	25.48 ± 0.46	13.27 ± 0.08	1.95	3.00

чтобы скорость потока вдоль колонки в каждом случае была эквивалентна примерно 15 см/сут, как требует стандарт. Продолжительность опробования была рассчитана для получения отношений $L/S = 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 3, 5$ и 10 л/кг.

Параметры фильтрата, измеренные и сравниваемые в этом исследовании, включали pH, ЭП, ОА, ООУ и различные металлы: Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Na, K, Ni, Zn.

Чтобы рассчитать по измеренным концентрациям высвобождение ЗВ (нагрузку ЗВ, выделившегося на единицу массы СО), использовалась формула:

$$M = \frac{C(v_1 - v_2)}{M_{\text{СВ}}},$$

где M – масса выделившегося ЗВ (мг/кг СВ), C – измеренная концентрация ЗВ (мг/л), $M_{\text{СВ}}$ – масса отходов (кг СВ), v_1 и v_2 – совокупные объемы (л) фильтрата (до и после опробования).

Эволюция поведения ЗВ в инфильтрационных тестах

Эволюция некоторых ЗВ в инфильтрационных тестах показывает, что начальная концентрация элементов (Ca, Cr, Cu, Na, Ni и Zn) значительно различается в каждом типе теста и обычно она выше в малых колонках, чем в средней. Подобное имеет место с ООУ: для средней колонки концентрация в начале теста составляет около 7500 мг/л, для малых колонок – от 12000 до 14000 мг/л. Однако Fe и Cd представляют более высокую начальную концентрацию в средней ко-

лонке, а ОА имеет сходные начальные концентрации в трех типах тестов. В большинстве случаев наблюдается снижение более чем на 75% от начальной концентрации для $L/S = 5$ л/кг и более чем на 95% для $L/S = 10$ л/кг.

Поначалу более медленное высвобождение ЗВ для колонок с мелкими частицами (А и В) приводит в конце эксперимента к большему вымыванию ЗВ по сравнению с остальными колонками для аналогичных отношений L/S . В колонках А и В высвобождается в среднем почти вдвое больше ООУ, чем в С и D. То же самое наблюдается и для ОА: в колонках А и В высвобождается 3.62 мг/г, тогда как в С и D – 2.50 мг/г.

Таблица 5 показывает, что для L/S , близкого к 10 л/кг, высвобождение ООУ и ОА в средней колонке составляло 40 и 45% от таковых в малых колонках соответственно. Более того, количество металлов, выделяемых в колонках С и D больше, чем в средней колонке, за исключением Fe. Это отчасти может быть связано с присутствием большего количества предпочтительных путей для потока воды в большей колонке, что способствует появлению участков отходов, изолированных от вымывания, которые не выносят ЗВ в фильтрат. Бóльшее высвобождение ЗВ в тестах соответствует более высоким начальным концентрациям. В общем, переход ЗВ в подвижное состояние более выражен в первый период экспериментов, когда преобладают процессы растворения и промывания поверхности, что со временем приводит к истощению растворимых или обменных компонентов. Меньший размер отходов, более доступная площадь поверхности на единицу массы и, следо-

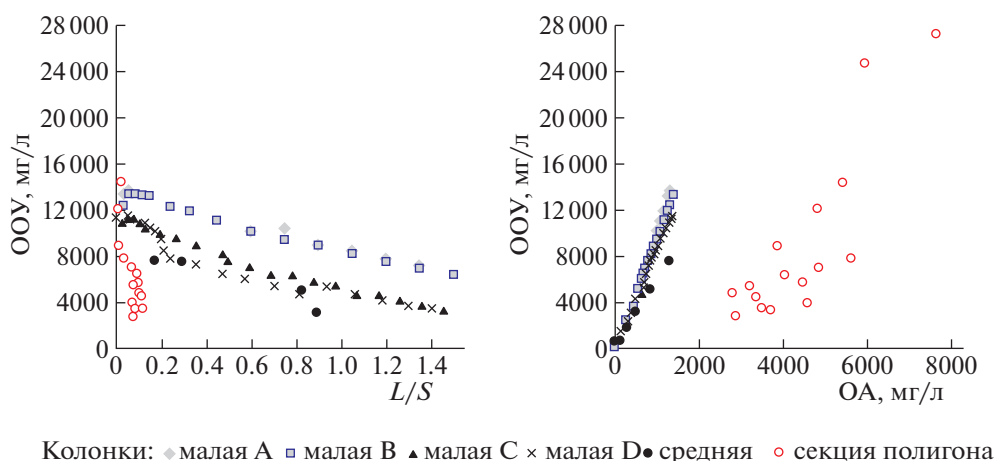


Рис. 5. Эволюция концентрации ООУ и корреляция ООУ и ОА в секции и в колонках [13].

вательно, площадь, которая может быть промыта, облегчают перенос ЗВ из твердой матрицы в жидкую фазу. Таким образом, размер частиц отходов определяет доступную контактную поверхность, которая вызывает более высокую начальную высвобождаемую концентрацию на первом этапе экспериментов, и это обуславливает высвобождаемую концентрацию для остальной части эксперимента. Результаты исследования [13] подтверждают, что размер частиц отходов определяет высвобождение ЗВ, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

Статический тест выщелачивания и инфильтрационный тест

В табл. 5 сравниваются результаты статических тестов выщелачивания и инфильтрационных тестов в колонках для отношения L/S , близкого к 10 л/кг. Количество ООУ, выделившегося в статическом тесте, на 22% больше, чем в инфильтрационном тесте в колонках С и D и на 68% больше, чем в средней колонке. Количество ОА примерно такое же, как в С и D, и на 56% больше, чем в средней колонке. Однако количество неорганических ЗВ, высвобождаемых в статическом тесте выщелачивания, обычно ниже, чем в малых колонках, но выше, чем в средней, за исключением Са и Сd. Эти результаты показывают, что для рассматриваемых отходов между двумя типами тестов нет прямой связи.

Различия в выделившейся органической нагрузке можно объяснить размером частиц, который в статическом тесте составляет 4 мм, т.е. меньше, чем во всех тестах с колонками. Однако высвобождение неорганических компонентов обычно больше в колонках, чем в статическом тесте. Это может быть связано с обновлением воды и большей продолжительностью экспериментов в колонках [14]. В статическом тесте вода, контак-

тирующая с материалом, вскоре достигает равновесных условий, в которых некоторые параметры, влияющие на выщелачиваемость, остаются практически стабильными. Это предотвращает образование градиентов некоторых параметров, таких как pH или ОВП, которые могут изменять растворимость многих неорганических соединений. Напротив, этим градиентам благоприятствует обновление воды в колонках, и такие эффекты будут больше из-за увеличенного времени контакта между элюатом и отходами [13].

Лабораторные тесты и натурный эксперимент

Отношение L/S , достигнутое в экспериментальной секции [12] после 18-месячного эксперимента, составило 0.11 л/кг. Это значение соответствует лишь первым точкам измерений в инфильтрационных тестах, но позволяет идентифицировать некоторые конкретные обстоятельства, которые происходят в натуральных условиях.

На рис. 5 показано изменение концентрации ООУ в экспериментальной секции по сравнению с динамикой, наблюдаемой в инфильтрационных тестах. Первоначальные концентрации, зарегистрированные в секции, выше, чем в лаборатории, что объясняется условиями насыщения колонок и тем фактом, что отходы попадают в натурные условия при высокой температуре (44°C) и без прохождения протокола для хранения образцов, который соблюдается в лаборатории. Быстро высвобождаются простейшие органические соединения, которые появляются в первых опробованиях. Несмотря на это, видно резкое снижение концентрации по сравнению с колонками, чему благоприятствует биологическая активность на полигоне. Микробальное разложение, которому способствовали высокие температуры, легко достигло метаногенной фазы в первый месяц. Газ, образующийся в секции, по-

Таблица 6. Высвобождение ЗВ в экспериментальной секции в конце натурного эксперимента, а также в средней и малых колонках при отношении L/S , аналогичном таковому в секции и статическом тесте выщелачивания [13]

Параметр	Экспериментальная секция	Средняя колонка	Малые колонки С и D	Статический тест выщелачивания
L/S , л/кг	0.11	0.16	0.13	10
pH	9.6–7.9 (8.9)	6.9	6.3	6.9
ЭП, мСм/см	61.8–31.5 (46.8)	17.0		
ООУ, мг/г СВ	857	618	1234	35 320
ОА, мг/г СВ	496	108	147	2520
$\text{NH}_4\text{-N}$, мг/кг СВ	418			90
Ca, мг/кг СВ	13	84		2462
Cd, мг/кг СВ	0.005	0.005		0.056
Cr, мг/кг СВ	0.091	0.007	0.035	<0.258
Cu, мг/кг СВ	0.203	0.083	0.442	2.193
Fe, мг/кг СВ	1.5	2.2	1.3	
Mg, мг/кг СВ	15	22	39	
Na, мг/кг СВ	522	114	236	1805
Ni, мг/кг СВ	0.177	0.088	0.174	1.204
Zn, мг/кг СВ	0.427	0.214	0.681	3.048

сле первых трех недель поддерживал концентрацию метана более 50%. В этих условиях часть органического вещества, растворенного в жидкости, разлагается до газа и поэтому исчезает из фильтрата. Напротив, инфильтрационные тесты проводились в значительно более короткие сроки (максимум 30 сут по сравнению с 18 мес) и при более низкой температуре (примерно 20°C), что снижает значимость биологической активности в процессе разложения по сравнению с непрерывным прохождением воды.

В табл. 6 для некоторых ЗВ показана общая нагрузка, выделяемая в секции при конечном отношении $L/S = 0.11$ л/кг, по сравнению с результатами лабораторных инфильтрационных тестов для аналогичного отношения L/S , а также в статическом тесте выщелачивания ($L/S = 10$ л/кг).

Один из важных моментов, который следует выделить, — различие в значениях pH: в секции он является щелочным и со временем увеличивается [12], а в колонках он ниже 7. Отсутствие активности микроорганизмов в лаборатории предотвращает биологические процессы, посредством которых pH в секции мог бы повышаться.

Количество неорганических ЗВ, вымытых при аналогичном отношении L/S , в секции выше, чем в колонках, за исключением Ca, Cd, Fe и Mg в средней колонке и Cu и Zn в малых колонках. Величина различия между тестами значительно варьирует для каждого ЗВ и в некоторых случаях сильно зависит от pH: высокий pH фильтрата в секции способствует осаждению и адсорбции некоторых катионов (Ca, Fe или Mg), как показано

в [9]. С другой стороны, Na, растворимость которого больше зависит от его доступности, чем от pH, быстрее выщелачивается в секции, достигая более высоких нагрузок при том же отношении L/S [13].

Значение pH обычно является щелочным, как на полигонах для необработанных отходов в метаногенной фазе [5], так и на полигонах CO с разной степенью разложения [15]. Но pH редко превышает 9, как это было в экспериментальной секции, вероятно, из-за щелочности некоторых строительных материалов, особенно из известкового гравия, используемого для сети сбора фильтрата. Со временем, когда эти материалы будут промыты, pH, вероятно, снизится, и в результате увеличатся растворимость и доступность катионов, которые ранее выпали в осадок [13].

В табл. 6 видно, что 20% азота в статическом тесте выщелачивания уже было выделено в секции, и это почти на 70% больше, чем в колонках при аналогичном L/S . Это высокое высвобождение в основном соответствует $\text{NH}_4\text{-N}$, поскольку в секции выделилось больше $\text{NH}_4\text{-N}$, чем в тесте выщелачивания (418 мг/кг против 290 мг/кг). Часть высвободившегося $\text{NH}_4\text{-N}$ образовалась во время предварительной биологической обработки на предприятии МБО, тогда как остальная часть — в секции в результате высоких температур, которые привели к снижению нитрификации и выделению азота в форме аммония. Кроме того, концентрация $\text{NH}_4\text{-N}$ может снижаться, главным образом, за счет его выделения в фильтрат и, во вторую очередь, за счет испарения ам-

миака, а также, возможно, за счет процесса анаэробного окисления аммония нитритом – анаммокс. Это приводит к тому, что для тех же значений ООУ высвобожденного ОА больше в секции по сравнению с колонками (см. рис. 5). Как следствие, линейная корреляция двух ЗВ в секции теряется.

Выводы относительно тестов, характеризующих отходы

Стандарт CEN/TS 14405 [4], использовавшийся в тестах с колонками, был включен в европейское законодательство по обращению с отходами для оценки соответствия остаточных материалов значениям пределов выщелачивания, связанных с использованием этих материалов в качестве вторичного сырья или с их размещением на полигонах. Однако с помощью этих тестов невозможно учесть взаимодействие с другими материалами и происходящее на полигоне биоразложение, или различные условия pH и температуры, которые влияют на вымывание ЗВ. Результаты [13] указывают на необходимость при установлении критериев учитывать биоразлагаемость отходов, т.е. проводить различие между отходами со значительным присутствием биоразлагаемых органических веществ и в основном небiorазлагаемыми отходами, как уже отмечали другие эксперты [3].

Графики, полученные для ЗВ в колонках (см. рис. 5), соответствуют модели адвекции-дисперсии, но не коррелируют с графиками для экспериментальной секции [12], которая никогда не бывает насыщенной и подвергается инфильтрации только атмосферными осадками. Таким образом, хотя эта модель иногда может быть полезной для прогнозирования выделения ЗВ, в целом она не отражает их высвобождение и требует модификации. В отходах со значительным присутствием разлагаемых органических веществ модель должна включать член, учитывающий биоразложение. Более того, биодegradация в СО становится значительной с момента их захоронения из-за сокращения метаногенной стадии. Комбинация микробной активности, высокой температуры и различных уровней pH может повлиять на выделение и перенос компонентов в фильтрат на полигоне.

Корректировка значений pH в лабораторных тестах может помочь проанализировать выделение неорганических загрязнителей в стабилизированные отходы. В таких случаях также следует тщательно учитывать взаимодействие с органическими веществами [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в Европе пытаются избежать прямого захоронения биоразлагаемых твердых коммунальных отходов (ТКО), чтобы умень-

шить их воздействие на окружающую среду. Такие воздействия, в частности, связаны с образованием сильно загрязненных фильтратов при окончательном захоронении этих отходов. Механико-биологическая обработка отходов (МБО) перед захоронением или использованием позволяет значительно снизить агрессивность фильтрата. При этом определение состава фильтрата является ключевым вопросом для оценки его долгосрочного воздействия на окружающую среду.

Для оценки выщелачивания отходов удобно использовать лабораторные эксперименты с объединением различных процедур тестирования (например, статические эксперименты или инфильтрационные тесты в колонках с восходящим потоком). Однако реакторы-имитаторы полигонов или экспериментальные секции на реальных полигонах позволяют лучше прогнозировать качество фильтрата в долгосрочной перспективе.

В экспериментах с крупномасштабными анаэробными реакторами изучалось возможное долгосрочное поведение стабилизированных отходов (СО) на полигонах ТКО путем моделирования анаэробных условий и сравнения с аналогичным экспериментом со свежими отходами из того же источника. Для СО наблюдалась очень короткая ацидогенная стадия (менее недели) по сравнению с 40 сут для свежих ТКО. Низкие конечные концентрации летучих жирных кислот в фильтрате СО указывали на то, что большая часть доступного органического вещества (ОВ) была преобразована в биогаз, и была достигнута биологическая стабилизация. Значения общего (ООУ) и растворенного органического углерода были очень близкими, т.е. большая его часть была растворена в фильтрате.

В реакторе наблюдалось более низкое содержание ОВ в фильтратах СО по сравнению со свежими ТКО. Данные по свежим ТКО подтверждают эффективность МБО в снижении концентрации ООУ в фильтрате, как на начальном этапе, так и после стабилизации. Поэтому *предварительная обработка может быть полезной для снижения не только первоначального, но и долгосрочного потенциала загрязнения на полигоне.*

Концентрации $\text{NH}_4\text{-N}$ в реакторе вначале увеличивались со временем (в отличие от снижения ООУ). Этот резкий рост можно объяснить прямым вымыванием аммония из отходов и микробным разложением азотистых ОВ, включая белки и аминокислоты. В дальнейшем $\text{NH}_4\text{-N}$ оставался постоянным в течение определенного периода, а затем концентрация очень медленно уменьшалась до стабильных значений. Возможные объяснения снижения аммония: сорбция, анаэробное окисление аммония (анаммокс) и преобразование в газообразный азот, микробное поглощение для роста, осаждение азота в виде струвита. Сравнение нагрузки фильтрата по $\text{NH}_4\text{-N}$

с данными по свежим ТКО показало, что концентрации для них были не только значительно выше, но также наблюдалось заметное увеличение с течением времени в отличие от постепенного снижения, наблюдаемого в СО. Таким образом, *преимущества предварительной обработки отходов в снижении нагрузки фильтрата аммонийным азотом очевидны.*

После начала метаногенеза в реакторе с СО произошло значительное снижение концентраций всех металлов, кроме хрома и кадмия, — из-за образования сильно восстановительной среды. Переход тяжелых металлов (ТМ) в нерастворимое состояние завершался примерно через 50 сут, и затем их концентрации оставались относительно постоянными до конца эксперимента. Возможные процессы истощения или удерживания металлов — это образование осадков (в основном сульфидов или карбонатов) и сорбция отходами и взвешенными частицами. Средние концентрации металлов в фильтрате из свежих ТКО были выше, чем для СО. *Предварительная обработка ТКО могла понизить содержание ТМ в отходах либо сделать их менее подвижными.*

Балансы массы углерода и азота показали, что их значительная часть осталась в отходах и не была высвобождена. Количество углерода, оставшегося в СО после полного разложения, составляло 57–63% от количества для необработанных ТКО. *Предварительная обработка ТКО приводит к удалению большего количества углерода, чем оставление его для разложения в относительно неконтролируемой среде полигона.*

Наиболее близки к реальным условиям захоронения отходов данные по экспериментальным секциям полигонов. Секция, построенная в Испании, была заполнена СО и наблюдалась в течение 18 мес. Результаты сравнивались с данными по полигону в целом, а также по другим полигонам различного возраста и с данными о СО различной степени компостирования. Было также проведено сравнение выщелачивания СО из экспериментальной секции с данными трех лабораторных тестов при близких отношениях L/S около 10 л/кг: один статический тест и два типа инфльтрационных тестов с колонками разного размера и с разной степенью измельчения СО. Показано, что *размер частиц отходов определяет выделение ЗВ, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.*

Первоначальные концентрации ООУ, зарегистрированные в секции, выше, чем в лаборатории: это объясняется условиями насыщения колонок и тем фактом, что отходы попадали в натурные условия полигона при высокой температуре (44°C) и без прохождения протокола для хранения образцов, который соблюдается в лаборатории. Быстро выделялись простейшие органические соединения, которые появлялись в пер-

вых опробованиях фильтрата. Несмотря на это, концентрации резко снижались по сравнению с колонками, чему благоприятствовала биологическая активность на полигоне. Микробиальное разложение легко достигло метаногенной фазы за первый месяц. Лабораторные тесты проводились в значительно более короткие сроки (максимум 30 сут по сравнению с 18 мес) и при более низкой температуре (~20°C), что снижает значимость биологической активности в процессе разложения по сравнению с непрерывным прохождением воды.

При сравнении результатов тестов в колонках с данными по экспериментальной секции при близких отношениях $L/S = 0.11$ л кг⁻¹ важно различие в рН. Отсутствие активности микроорганизмов в лаборатории предотвращает биологические процессы, посредством которых повышается рН в секции. Количество неорганических ЗВ, высвобожденных при аналогичном отношении L/S , обычно выше в секции, чем в колонках. Величина различия между тестами значительно варьирует для каждого ЗВ и в некоторых случаях сильно зависит от рН: высокий рН фильтрата в секции способствует осаждению и адсорбции некоторых катионов. Другие ЗВ, например, Na, растворимость которого больше зависит от его доступности, чем от рН, быстрее выщелачивались в секции.

Отмечено, что в статическом тесте выщелачивания 20% азота уже было выделено в секции, что почти на 70% больше, чем в колонках при аналогичном L/S . Это высокое выделение в основном соответствовало $\text{NH}_4\text{-N}$. Часть этого аммония образовалась во время предварительной биообработки на предприятии МБО, а остальная часть — в секции при высоких температурах, приводящих к снижению нитрификации и выделению азота в форме аммония. Концентрация $\text{NH}_4\text{-N}$ может также снижаться за счет его выделения в фильтрат, испарения аммиака и, возможно, анаэробного окисления аммония нитритом (анаммокс). Поэтому для тех же значений ООУ высвобожденный ОА был больше в секции, чем в колонках.

Таким образом, с помощью стандартных тестов с колонками невозможно учесть взаимодействие с другими материалами и биоразложение, которое происходит на полигоне, или различные условия рН и температуры. Результаты, полученные для органических ЗВ в колонках, соответствуют модели адвекции-дисперсии, но не коррелируют с результатами для экспериментальной секции, которая никогда не бывает насыщенной и подвергается выщелачиванию только атмосферных осадками. Таким образом, линейная модель высвобождения ЗВ требует модификации. *В отходах со значительным присутствием разлагаемых органических веществ, модель должна включать член, учитывающий биоразложение отходов.*

Биодеградация в стабилизированных отходах становится значительной сразу с момента их захоронения из-за сокращения неметаногенной фазы. Комбинация микробной активности, высокой температуры и различных уровней pH может повлиять на выделение и перенос компонентов в фильтрат на полигоне. Поэтому *тесты в колонках со стабилизированными отходами должны проводиться, по крайней мере, со щелочным pH и близким к реальным значениям размером частиц*. Это позволит достичь результатов, максимально приближенных к полученным на реальном полигоне, с использованием простой линейной модели.

Таким образом, МБО может быть полезной для снижения не только первоначального, но и долгосрочного потенциала загрязнения отходов на полигоне. *Необходимо на каждом предприятии МБО отрегулировать технологию, как механической, так и биологической обработки поступающих отходов для достижения приемлемого для захоронения качества СО, используя лабораторные эксперименты по выщелачиванию*. Тогда полигоны, принимающие СО, будут представлять опасность для подземных вод аналогичную обычным метаногенным полигонам ТКО, и, следовательно, вероятно, потребуются аналогичный период времени, прежде чем отпадет необходимость активного управления полигоном и обработки фильтрата. Прогнозирование продолжительности этого периода на конкретном полигоне требует детальных исследований.

Автор благодарит к.х.н. В.С. Путилина за внимание к работе и полезные замечания.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы” и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00574.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юганова Т.И. Продукты механико-биологической обработки твердых коммунальных отходов: состав, сравнение биоактивности с захороненными ТКО, тяжелые металлы // Геоэкология. 2022. № 3. С. 69–81.
2. Юганова Т.И. Выщелачивание загрязняющих веществ из продуктов механико-биологической обработки твердых коммунальных отходов: состав фильтрата, допустимость захоронения на полигонах ТКО // Геоэкология. 2022. № 6. С. 57–75.
3. Assessing Legal Compliance with and Implementation of the Waste Acceptance Criteria and Procedures by the EU-15, Final Report / European Commission, Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen. Brussels, 2009. 65 pp. URL: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/landfill/report_wac15.pdf (дата обращения 31.03.2022).
4. CEN/TS 14405:2004. Characterization of Waste – Leaching Behaviour Tests – Up-Flow Percolation Test (Under Specified Conditions) / European Committee for Standardization (CEN). 2004. URL: <https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewj2jpn30On-wAhXNHXcKHeaQBxOQFjAEegQ-IBxAD&url=https%3A%2F%2Ffilnas.services-publics.lu%2Fecnor%2FdownloadPreview.action%3FdocumentReference%3D15533&usg=AOvVaw1yzV6HR-wKbSatpL6nao6b5> (дата обращения 31.03.2022).
5. Christensen T.H., Kjeldsen P., Bjerg P.L., Jensen D.L., Christensen J.B., Batin A., Albrechtsen H.-J., Heron G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes // Applied Geochemistry. 2001. V. 16. №7-8. P. 659–718.
6. Council directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. 1999. 19 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:1999:182:FULL&from=EN> (дата обращения 31.03.2022).
7. Ivanova L.K., Richards D.J., Smallman D.J. The long term settlement of landfill waste // Waste & Resource Management. 2008. V. 161. № 3. P. 121–133.
8. Ivanova L.K., Richards D.J., Smallman D.J. Assessment of the anaerobic biodegradation potential of MSW // Waste & Resource Management. 2008. V. 161. № 4. P. 167–180.
9. Kjeldsen P., Barlaž M.A., Rooker A.P., Baun A., Ledin A., Christensen T.H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review // Critical Reviews in Environmental Science & Technology. 2002. V. 32. № 4. P. 297–336.
10. Kylefors K., Andreas L., Lagerkvist A. A comparison of small-scale, pilot-scale and large-scale tests for predicting leaching behaviour of landfilled wastes // Waste Management. 2003. V. 23. № 1. P. 45–59.
11. Lombardi F., Costa G., Sirini P. Analysis of the role of the sanitary landfill in waste management strategies based upon a review of lab leaching tests and new tools to evaluate leachate production // Revista Ambiente & Água. 2017. V. 12. № 4. 13 p.
12. López A., García M., Esteban-García A.L., Cuartas M., Molleda A., Lobo A. Emissions from mechanically biologically treated waste landfills at field scale // International Journal of Environmental Science & Technology. 2018. V. 15. № 6. P. 1285–1300.
13. Molleda A., López A., Cuartas M., Lobo A. Release of pollutants in MBT landfills: Laboratory versus field // Chemosphere. 2020. V. 249. Article 126145.
14. Pantini S., Verginelli I., Lombardi F. Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests // Waste Management. 2015. V. 38. P. 22–32.
15. Robinson H.D., Knox K., Bone B.D., Picken A. Leachate quality from landfilled MBT waste // Waste Management. 2005. V. 25. № 4. P. 383–391.
16. Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W. Investigations into the landfill behaviour of pretreated wastes // Waste Management. 2012. V. 32. № 7. P. 1420–1426.
17. Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W. Biodegradation and flushing of MBT wastes // Waste Management. 2013. V. 33. № 11. P. 2257–2266.
18. van Praagh M., Heerenklage J., Smidt E., Modin H., Stegmann R., Persson K.M. Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes // Waste Management. 2009. V. 29. № 2. P. 859–868.

LEACHING OF CONTAMINANTS FROM BURIED PRODUCTS OF MECHANICAL-BIOLOGICAL WASTE TREATMENT IN LARGE-SCALE EXPERIMENTS

T. I. Yuganova^{a, #}

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

[#] *E-mail: tigryu@gmail.com*

Large-scale experiments on the leaching of pollutants from the products of mechanical and biological treatment of municipal solid waste (MSW) simulating the disposal at a real landfill are considered. These are studies in large reactors and in the experimental section of the MSW landfill, where stabilized waste is placed. The results of these experiments are described and compared with those obtained in the course of various laboratory tests. Recommendations are given for improving laboratory tests and predictive models.

Keywords: *municipal solid waste, mechanical-biological treatment, stabilized waste, leaching, organic matter, heavy metals, large-scale experiments*

REFERENCES

1. Yuganova, T.I. *Produkty mekhaniko-biologicheskoi obrabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov: sostav, sravnenie bioaktivnosti s zakhoronennymi TKO, tyazhelye metally* [Products of mechanical-biological treatment of municipal solid waste: composition, comparison of bioactivity with buried MSW, heavy metals]. *Geoekologiya*, 2022, no. 3, pp. 69–81. (in Russian)
2. Yuganova, T.I. *Vyshchelachivanie zagryaznyayushchikh veshchestv iz produktov mekhaniko-biologicheskoi obrabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov: sostav fil'trata, dopustimost' zakhoroneniya na poligonakh TKO* [Leaching of pollutants from the products of mechanical-biological treatment of municipal solid waste: composition of the leachate, admissibility of disposal at MSW landfills]. *Geoekologiya*, 2022, no. 6, pp. 57–75. (in Russian)
3. Assessing legal compliance with and implementation of the waste acceptance criteria and procedures by the EU–15, Final Report. European Commission, Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen. Brussels, 2009. 65 pp. Available at: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/landfill/report_wac15.pdf (accessed 31.03.2022).
4. CEN/TS 14405: 2004. Characterization of waste – leaching behaviour tests – up-flow percolation test (under specified conditions). European Committee for Standardization (CEN), 2004. Available at: <https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewj2jpn30OnwAhXNHXcKHeaQBxoQFjAEegQ-IBxAD&url=https%3A%2F%2Ffilnas.services-publics.lu%2Fecnor%2FdownloadPreview.action%3FdocumentReference%3D15533&usg=AOvVaw1yzV6HR-wKbSatpL6nao6b5> (accessed 31.03.2022).
5. Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Jensen, D.L., Christensen, J.B., Batin, A., Albrechtsen, H.-J., Heron, G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 2001, vol. 16, no. 7–8, pp. 659–718.
6. Council Decision of 19 December 2002 on establishing criteria procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC. European Council, 2002, 23 pp. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003D0033&from=GA> (accessed 31.03.2022).
7. Ivanova, L.K., Richards, D.J., Smallman, D.J. The long-term settlement of landfill waste. *Waste & Resource Management*, 2008, vol. 161, no. 3, pp. 121–133.
8. Ivanova, L.K., Richards, D.J., Smallman, D.J. Assessment of the anaerobic biodegradation potential of MSW. *Waste & Resource Management*, vol. 161, no. 4, pp. 167–180.
9. Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T.H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2002, vol. 32, no. 4, pp. 297–336.
10. Kylefors, K., Andreas, L., Lagerkvist, A. A comparison of small-scale, pilot-scale and large-scale tests for predicting leaching behaviour of landfilled wastes. *Waste Management*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 45–59.
11. Lombardi, F., Costa, G., Sirini, P. Analysis of the role of the sanitary landfill in waste management strategies based upon a review of lab leaching tests and new tools to evaluate leachate production. *Revista Ambiente & Água*, 2017, vol. 12, no. 4, 13 p.
12. López, A., García, M., Esteban-García, A.L., Cuartas, M., Molleda, A., Lobo, A. Emissions from mechanically biologically treated waste landfills at field scale. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 15, no. 6, pp. 1285–1300.
13. Molleda, A., López, A., Cuartas, M., Lobo, A. Release of pollutants in MBT landfills: Laboratory versus field. *Chemosphere*, 2020, vol. 249, Article 126145.
14. Pantini, S., Verginelli, I., Lombardi, F. Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests. *Waste Management*, 2015, vol. 38, pp. 22–32.
15. Robinson, H.D., Knox, K., Bone, B.D., Picken, A. Leachate quality from landfilled MBT waste. *Waste Management*, 2005, vol. 25, no. 4, pp. 383–391.
16. Siddiqui A.A., Richards D.J., Powrie W. Investigations into the landfill behaviour of pretreated wastes. *Waste Management*, 2012, vol. 32, no. 7, pp. 1420–1426.
17. Siddiqui, A.A., Richards, D.J., Powrie, W. Biodegradation and flushing of MBT wastes. *Waste Management*, 2013, vol. 33, no. 11, pp. 2257–2266.
18. van Praagh, M., Heerenklage, J., Smidt, E., Modin, H., Stegmann, R., Persson, K.M. Potential emissions from two mechanically-biologically pretreated (MBT) wastes. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 2, pp. 859–868.

УДК 551.345

ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ

© 2023 г. А. Н. Хименков^{1,*}, Е. О. Дернова^{1,**}, Ю. В. Станиловская^{2,***}

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

²Total Energies, ул. Лесная, 7, Москва, 125196 Россия

*E-mail: a_khimenkov@mail.ru

**E-mail: dernova.eo@gmail.com

***E-mail: yulia.stanilovskaya@total.com

Поступила в редакцию 11.11.2022 г.

После доработки 19.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Исследования последних десятилетий показали, что газовая составляющая играет значительную роль в строении и свойствах мерзлых пород. На это указывает значительное поступление парниковых газов в атмосферу из криолитозоны; выбросы газа, приводящие к авариям на буровых скважинах; образование воронок газового выброса и др. Эти процессы определяются соотношением характеристик газовой составляющей и показателей физико-механических свойств мерзлых пород, которые к настоящему времени изучены недостаточно. В статье рассмотрены механизмы формирования газонасыщенных зон; проведена оценка влияния газа на физико-механические свойства талых и мерзлых грунтов; проанализированы процессы, связанные с воздействием газа на грунтовый массив.

Ключевые слова: газонасыщенные мерзлые породы, криогенная концентрация, разрывные деформации, пластические деформации, газовые каналы, фильтрация газа, газовые ловушки, диссоциация газогидратов, напорная фильтрация газа

DOI: 10.31857/S0869780923010058, EDN: HSMUDJ

ВВЕДЕНИЕ

Строение и свойства мерзлых пород обусловлены взаимодействием твердых, жидких и газообразных компонентов. Основная твердая составляющая — минеральные частицы и лед, жидкая — различные категории воды (свободная, рыхло- и прочносвязанная), газообразная — вся совокупность газов и водяного пара, содержащихся в мерзлых породах. Два первых компонента изучены довольно хорошо, выявлены количественные характеристики, показывающие их влияние на формирование, строение и свойства мерзлых пород. На их основе разработаны различные классификации, проведены исследования механических свойств, закрепленные в нормативных документах, разрабатываются прогнозы поведения пород при различных сценариях изменения климата. Газовая составляющая, ее влияние на строение и свойства мерзлых пород рассмотрены гораздо слабее. При оценке свойств мерзлых грунтов газовую компоненту практически не учитывают, ее роль не рассматривается при проведении проектных и инженерно-геокриологических работ или разработке прогнозов развития

неблагоприятных процессов при изменении внешних условий. Данная тема научных исследований казалась незначительной и имеющей только академический интерес. В последние десятилетия отношение к оценке роли газов в криолитозоне меняется. Выяснилось, что наличие газовой составляющей мерзлых пород ухудшает их прочностные и деформационные характеристики. При повышении температуры, даже в области отрицательных значений, или изменения порового давления при техногенных воздействиях в мерзлых толщах возникает фильтрация газа. Установлено, что эмиссия метана из мерзлых пород может достигать уровней, способных вызвать значительное и даже катастрофическое потепление нашей планеты [22]. При бурении скважин наблюдаются многочисленные газопроявления, выражающиеся в выбросе бурового инструмента, шлама, промывочной жидкости и т.д. Диапазон глубин, с которых происходит большинство выбросов, составляет от 10 до 100 м [1, 14, 15, 28]. В последние годы на территории Западной Сибири обнаружены воронки глубиной в десятки метров, связанные с естественными выбросами под-

земных газов из мерзлых пород. Все это свидетельствует о том, что в настоящее время наблюдается значительное несоответствие между теоретическими представлениями о роли газовой составляющей криогенных толщ и происходящими в них реальными процессами.

В настоящее время для выделения различных типов мерзлых пород используются такие показатели, как: льдистость, криогенное строение, засоленность, вещественный состав, температура и др. При этом такой показатель, как газонасыщенность, полностью отсутствует, что оставляет значительную группу мерзлых пород с присущими им специфическими свойствами и процессами вне рамок специального изучения. Учитывая масштабы освоения углеводородных месторождений, расположенных в криолитозоне, и степень распространения там газонасыщенных пород, вовлеченных в хозяйственную деятельность, это выглядит анахронизмом.

Целью предлагаемой публикации является обобщение существующей разрозненной информации о формировании газовой составляющей в породах, причинах концентрации газа и локализации газонасыщенных зон, значениях газонасыщенности и морфологии газовых включений в мерзлых породах. Проанализированы имеющиеся данные по давлениям, возникающим в мерзлых толщах, а также об интенсивности процессов, связанных с перераспределением газа. Данная работа необходима для разработки различных классификационных признаков газонасыщенных мерзлых пород, а также отработки технологий проведения лабораторных испытаний, учитывающих их особенности.

НАКОПЛЕНИЕ БИОХИМИЧЕСКОГО ГАЗА

Интенсивность естественной биохимической газогенерации, являющейся источником биогенных газов, зависит от фациальных условий осадконакопления. Если выделяемые микроорганизмами газы не успевают посредством диффузионного механизма отводиться от мест генерации в атмосферу, то их концентрация становится столь велика, что превышает их растворимость, в связи с чем возникает газовая фаза, формирующаяся в виде газового пузырька. Находя пути наименьшего сопротивления и совершая колебательные движения, пузырек газа стремится в область меньших давлений. Таким образом, формируется региональный фон углеводородных газов. Если отвод газа затруднен, то могут формироваться газонасыщенные зоны, приуроченные к линзам проницаемых пород или сводам антиклинальных структур, перекрытых слабо проницаемыми породами. Давление в таких геосистемах будет непрерывно возрастать до тех пор, пока оно либо остановит жизнедеятельность бактерий, либо до-

стигнет того уровня, при котором нарушится целостность кровли [4]. Учитывая, что атмосферное давление даже в несколько сот атмосфер оказывает слабое действие на жизнедеятельность бактерий [25], пластовое давление в литологических ловушках может быть значительным, намного превосходить гидростатическое и ограничиваться только прочностными показателями вмещающих пород. Разрушение пород, перекрывающих газовые карманы, довольно частое явление для слабо литифицированных субаквальных осадков. На территории Санкт-Петербургского региона при бурении скважин на глубинах 8–40 м были зафиксированы десятки газо-грязевых выбросов, иногда сопровождавшихся возгоранием газа [13]. При бурении инженерно-геологических скважин в пределах мелководных районов Печорского и Карского морей неоднократно отмечались выбросы газовой смеси, насыщенной взвешенными грунтовыми частицами. Выбросы происходили в диапизоне с глубин от 20 до 50 м ниже поверхности дна. Эти выбросы связаны с интервалами газонасыщенных осадков, имеющих аномально высокое пластовое давление [20].

НАКОПЛЕНИЕ ГАЗА В ЗОНАХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

Содержание биогенных газов, образующихся в субаквальных осадках, соответствует, как правило, их региональному фоновому значению. При этом аномальные концентрации углеводородных газов связаны с поступлением из внешних источников за счет миграции глубинного газа [18]. В зонах тектонических нарушений газ по системе трещин и разломов мигрирует к поверхности из нижележащих горизонтов. В этом случае могут формироваться области повышенного газонасыщения, в которых концентрация газов может намного превышать фоновые значения. Например, фоновые значения содержания метана в донных осадках Карского моря составляют около 0.001 мл/кг, а в пределах газовых аномалий, как правило, приуроченных к зонам разрывных нарушений, превышение составляет более чем в 100 раз [19]. В дальневосточных морях в придонном слое воды фоновые концентрации метана обычно составляют 0.00007–0.00009 мл/л. Над месторождениями нефти и газа содержание метана в 10–100 раз превышает фоновые значения. В придонной воде над Лунской структурой (Охотское море) наблюдается содержание метана в центральной части структуры 0.011 мл/л, что на два порядка превышает фон. Столь высокая аномалия связана с сильной нарушенностью структуры — верхней части осадочного чехла [17]. На присахалинском шельфе в придонной воде фоновыми являются концентрации метана 60–90 мл/л; в районе распространения глинистых осадков

содержание метана еще меньше и не превышает 10 мл/л. Биогенный метан, образующийся в донных отложениях, не создает аномалии в придонном слое воды. Они возникают только в тех случаях, когда над формирующейся газовой залежью формируются трещиноватые зоны в перекрывающих ее породах, и возникает подток углеводородных газов. В этих районах содержание метана может превышать фоновый на порядки. В районах выхода газа в керне донных илистых осадков были обнаружены пустоты и включения газогидратов [18].

КРИОГЕННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ВНУТРИГРУНТОВЫХ ГАЗОВ

Основными причинами присутствия газа в еще не промерзших отложениях являются биохимические процессы, связанные с разложением органики в результате жизнедеятельности бактерий или поступления газа из нижележащих горизонтов. Оба механизма не могут обеспечить значительное содержание газов непосредственно в мерзлых породах. Первый, в силу того, что при отрицательных температурах жизнедеятельность бактерий значительно ослаблена; второй — потому что в мерзлых породах прекращается или значительно ослабевает фильтрация газа. В ходе эпигенетического промерзания создаются криогенные напоры, обуславливающие значительное перераспределение концентрации газа в мерзлых породах.

Эпигенетическое промерзание пород — мощный фактор перераспределения внутригрунтовых газов и включения их в состав мерзлых пород. Г.Н. Краев и соавт. [11] в ходе лабораторного моделирования миграции газа при одностороннем промерзании насыщенных метаном суглинистых и песчаных грунтов установил, что в суглинках метан при промерзании сконцентрировался в верхней части образца за счет миграции влаги (и газа вместе с ней) к фронту промерзания, тогда как в нижней части содержание газа уменьшилось. В песках, наоборот, наблюдалось его отжатие к газонепроницаемой подошве. Результаты эксперимента позволили авторам сделать вывод о том, что распределение метана в эксперименте есть результат специфической миграции газа вместе с поровым раствором в суглинках и песках.

Полученные в лабораторных экспериментах результаты подтвердились в ходе изучения динамики криогенной концентрации метана при неравномерном промерзании деятельного слоя. Средние значения концентрации метана у подошвы сезонно-талого слоя (СТС) — около 2 см³/кг формируются за счет биогенного продуцирования. На некоторых локальных участках концен-

трация метана достигала 15 см³/кг. Для этого потребовался биогенный метан из 11–12 соседних участков. Данный факт может быть объяснен только при допущении возможности перераспределения газа по латерали [12].

Наиболее газонасыщенные мерзлые породы расположены на участках нефтегазовых структур. В этом случае газонасыщение обуславливается совместным действием нескольких факторов:

- тектонического, связанного с деформированием пород, приуроченных к локальным тектоническим структурам, что обуславливает движение глубинного газа к поверхности;

- гидрологического, связанного с движением потоков грунтовых газонасыщенных вод к поверхности;

- криогенного, обусловившего эпигенетическое промерзание литологически разнородной, водо- и газонасыщенной толщи, в результате чего формируется сложно построенный парагенез криогенных образований, включающих пластовые льды, льдистые мерзлые породы, криопэги, горизонты газогидратов и “карманы” напорных свободных газов.

В результате взаимодействия перечисленных факторов формируются наиболее выраженные газонасыщенные мерзлые породы.

Еще до промерзания над тектоническими структурами, в которых формируются залежи углеводородов, наблюдается повышенное содержание газов. Здесь в глинистой покрывке, в пределах контура залежи, широко распространены высоконапорные мелкие скопления углеводородов. При удалении от свода аномальность пластового давления в этих скоплениях уменьшается, а за контуром залежи исчезают газопроявления и в покрывке [6]. Геохимические исследования рассеянных углеводородных газов, проведенные на территории Бованенковского и Харасавейского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), показали неравномерность их концентрации в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород. В скважинах глубиной до 3 м, расположенных в контуре месторождений, значения концентраций углеводородных газов оказались более чем в 2 раза выше, чем за пределами контуров [3]. Такое распределение значений концентрации углеводородных газов отражает общие закономерности газонасыщенности мерзлых пород в районах газовых месторождений.

СТЕПЕНЬ ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ГАЗА В НИХ

Степень газонасыщенности мерзлых пород и морфология газовых включений — важные характеристики для изучения роли газовой компонен-

ты в строении мерзлых толщ. Таких данных немного и сосредоточены они в основном в местах расположения месторождений углеводородов. По данным Ф.Э. Арэ [1], изучавшим газонасыщенные мерзлые породы в районе трассы железной дороги Обская-Бованенково, в кернах многих инженерно-геологических скважин зафиксированы горизонтально ориентированные макропустоты чечевицеобразной формы толщиной до 12 мм. Иногда наблюдались скопления мелких субгоризонтальных ломанных пустот толщиной до 1 мм. Наблюдаемая газовая пористость в суглинках в среднем составляла 5–7%, достигая 10%, а в некоторых случаях до 50%. В песках средняя величина газовой пористости составляла 0.5%. Было установлено, что верхние слои многолетнемерзлых пород (до 100 м) над нефтегазовыми месторождениями содержат значительное количество свободного газа под избыточным давлением. Вместилищем свободного газа в многолетнемерзлых породах могут служить горизонты мелкозернистых песков прибрежно-морского генезиса с повышенной газовой микро- и макропористостью, перекрытых глинистыми осадками. В них наблюдались многочисленные выбросы газа, длительность которых иногда прослеживалась до месяца и более. Продолжительные выделения газа из скважин, пробуренных в многолетнемерзлых породах, свидетельствуют о их существенной газопроницаемости и возможности фильтрации через них [1].

Газонасыщенные мерзлые породы широко распространены на территории Бованенковского НГКМ. Многолетнемерзлые породы здесь представлены преимущественно глинами с песчаными прослоями различной мощности. К песчаным слоям и линзам приурочены газопроявления различной интенсивности и продолжительности. Газ находится в свободной форме или в виде газогидратов.

По содержанию газа выделяются два типа мерзлых пород. Первый соответствует горизонтам, где газовыделение отсутствует. В них содержание газа незначительно и составляет $0.005 \text{ см}^3/\text{г}$. Удельная пористость, свободная ото льда и незамерзшей воды, либо равна, либо превышает газосодержание, что свидетельствует о свободной форме газовых включений. Второй тип приурочен к горизонтам газопроявлений. Отличительной особенностью данных пород является наличие каверн изометричной формы диаметром 5–8 мм и глубиной до 7 мм. Стенки каверн гладкие, сами каверны часто заполнены фирноподобным снегом. Газосодержание в грунтах в этих условиях достигает $0.5 \text{ см}^3/\text{г}$. Количество газа в них превышает свободную пористость на 2–3 порядка. Дебиты газовых выбросов колеблются от 50 до $14000 \text{ м}^3/\text{сут}$ при средних значениях порядка

$800\text{--}1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Объемы газа достигают значительных размеров. В одной из скважин (64-П-2) в интервале 72–80 м запас газа был оценен в 490 тыс. м^3 , а площадь газовой залежи в 80 тыс. м^2 [3, 14]. Такие дебиты и размеры залежей свидетельствуют о том, что в мерзлых породах существует или формируется мощная сеть каналов, по которым осуществляется фильтрация газа к скважине.

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

В целом влияние газовой составляющей на инженерно-геологические условия для талых и мерзлых грунтов изучено недостаточно. Отсутствуют классификации газонасыщенных грунтов, не разработаны нормативные документы, регламентирующие применение данных грунтов в качестве оснований инженерных сооружений, нет методик оценки возможных рисков. При этом даже отдельные фрагментарные наблюдения свидетельствуют о важности данной проблемы. Рассмотрим некоторые материалы по данной теме, большинство из которых относится к талым породам.

Из теории фильтрационной консолидации известно, что даже незначительное газонасыщение предопределяет повышение порового давления и замедление процесса консолидации грунтов. В тонкодисперсных грунтах газовые включения перекрывают капилляры, что существенно замедляет процессы их консолидации под нагрузками. Например, метан, образующийся на болотах, а также в морских и озерных осадках, может скапливаться в виде мелких газовых пузырьков, повышая поровое давление и снижая водопроницаемость отложений. С этим, во многом, связана низкая плотность молодых осадков [26]. Наличие газа в грунтах может приводить к увеличению порового давления до 0.4 МПа и более. Это ведет к взвешиванию грунта, уменьшению сил трения, ослаблению связей между частицами грунта, переходу в плавунное состояние [21]. Накопление малорастворимых газов (CH_4 , N_2 , H_2) в песчано-глинистых породах вызывает изменение их напряженно-деформированного состояния. Существенно возрастает тиксотропность, снижается угол внутреннего трения грунтов вплоть до их перехода в плавунное состояние даже при незначительных динамических и вибрационных воздействиях [5]. С.И. Рокосом проведен анализ изменения физико-механических свойств газонасыщенных осадков Арктических морей с аномально высоким внутрипластовым давлением [20]. Было установлено, что повышенное пластовое давление снижает литостатическое (бытовое) и влияет на напряженно-деформированное состояние грунтового массива. Это выражается в сниже-

нии прочности и плотности при одновременном увеличении текучести, сжимаемости и пористости, что делает газонасыщенные грунты с избыточным внутривластным давлением неустойчивыми к внешним динамическим нагрузкам и служит одной из причин многочисленных естественных деформаций. Когда давление в газонасыщенном горизонте достигает некоторого критического значения, вероятно сопоставимого с сопротивлением недренированному сдвигу осадков (около 5–30 КПа), происходит деформация данной толщи. В грунтах, где давление газа близко к гидростатическому, существенного изменения свойств не наблюдалось. При снижении внешнего давления или повышении температуры газ, скопившийся в “мини-ловушках”, расширяется. Это вызывает смятие и выжимание к поверхности вмещающих и вышележащих отложений. При бурении происходят выбросы газовой смеси, насыщенной взвешенными грунтовыми частицами. Автором было отмечено, что при изучении физико-механических свойств газонасыщенных грунтов следует учитывать дегазацию при подготовке образцов, что изменяет их свойства относительно условий естественного залегания (*in situ*) [20].

Сотрудниками лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН было проведено изучение выделения газов из мерзлых грунтов при повышении их температуры [9, 10]. Испытания проводились на твердых и тугопластичных суглинках, а также песках. Содержание газов в образцах (растворенных, адсорбированных и свободных) достигало 4–5%. В результате исследований выявлено, что выделение газов начинается уже при незначительных изменениях температуры мерзлых грунтов. При объемном давлении 0.001 МПа для песчаных грунтов газовыделение начинается при температуре -5°C , достигает своего максимума при $+1^{\circ}\text{C}$. Для глинистых грунтов выделение газа начинается также при -5°C , пик наступает при температуре -2°C , а затем, как и в песчаных грунтах, интенсивность газовыделения сокращается.

Действие внешних нагрузок снижает температуру начала газовыделения и влияет на его динамику при изменении температуры. В песчаных грунтах температура начала выделения газовых включений при увеличении величины объемного сжимающего давления постепенно снижается до -8°C (при давлении 0.2 МПа). В суглинках температура начала выделения газа также постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от -7°C при давлении 0.05 МПа до -8°C (при давлении 0.2 МПа). Наибольшая интенсивность газовыделения наступает при температуре ниже температуры заморзания-оттаивания грунта: -3°C при давлении 0.05 МПа, -4°C при 0.1–0.2 МПа. При повыше-

нии температуры в таких мерзлых грунтах происходит изменение фазового состава влаги, начинают происходить объемные тепловые деформации с появлением трещин, возникают дефектные зоны на границах распределения фаз, увеличивается содержание незамерзшей воды; расширяясь, газовые включения образуют систему фильтрационных каналов между собой. Это приводит к повышению газопроницаемости, в результате чего из непроницаемых мерзлых грунтов может происходить выделение газа [9]. При повышении температуры грунтов толщина пленок связанной воды увеличивается, часть ее может переходить в свободную. В таких условиях, при повышении температуры в мерзлых грунтах может происходить выделение газов, содержащихся в слоях гидратных пленок, при том, что свободная вода в этих условиях остается заморзшей [10].

С этими результатами согласуются данные о фильтрации газа сквозь мерзлые образцы, полученные в ходе лабораторных исследований на кафедре геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова. Газ подводился по замороженному в образец штуцеру, под давлением около 0.3 МПа. Испытания проводились на образцах льда различной солености и содержанием каолина с начальной влажностью, близкой к верхнему пределу пластичности, что обеспечило высокую льдистость после промораживания. Температура образцов повышалась от -9°C до значений, близких к 0°C . При температуре около -1°C в образцах пресного льда и льдистого каолина наблюдалась фильтрация газа. Структурные исследования показали, что газ фильтруется в виде разрозненных потоков мелких вытянутых пузырьков диаметром в доли миллиметров. Газовые пузырьки приурочены к локальным деформациям [27]. В обоих случаях при повышении температуры мерзлых образцов в них наблюдается фильтрация газа. В первом удаляется газ, содержащийся в самом образце; во втором — перераспределяется газ, подаваемый извне.

ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени выявлена зависимость механических свойств мерзлых пород от многих факторов (засоленности, льдистости, гранулометрического и минералогического составов), однако влиянию газовой составляющей на их прочностные и деформационные свойства должного внимания уделено не было. Рассмотренные материалы показали, что наличие газов оказывает значительное влияние на физико-механические свойства как талых, так и мерзлых грунтов. Наличие газа в грунтах приводит к перекрытию капилляров, увеличению порового давления, ослаблению консолидации грунта, ослаблению связей между частицами. Это, в свою очередь, выражается в снижении прочности и плотности при

одновременном увеличении сжимаемости и пористости, что делает газонасыщенные грунты неустойчивыми к внешним естественным и техногенным нагрузкам и возникновению деформаций в грунтовом массиве.

Газовыделение в условиях повышения температуры мерзлых грунтов приводит к их разуплотнению и соответствующему снижению прочности. Наиболее интенсивное снижение показателей деформационных свойств суглинков (угла внутреннего трения ϕ и сцепления C) соответствует наиболее интенсивному выделению газа (в опытах без нагрузок при температурах -2 — -3°C), при сжимающих нагрузках 0.1 – 0.2 МПа в диапазоне температур от -7 до -4°C). При дальнейшем повышении температуры (но в пределах отрицательных значений) интенсивность выделения газа падает, одновременно снижается интенсивность изменения прочностных свойств [8]. Результатом выделения газа из мерзлых пород будут уменьшение их пористости и уплотнение.

Различия в газонасыщенности мерзлых грунтов определяется историей и даже предысторией их формирования. Как было рассмотрено выше, накопление газа в грунтах связано и с жизнедеятельностью бактерий, и с перемещением газа из нижележащих пород. Рассеянный грунтовый газ накапливается в так называемых “ловушках” или “карманах”, формирование которых определяется литологическими или тектоническими причинами. Давление газа в местах их локализации даже на глубинах в несколько десятков метров может достигать значительных величин, приводящих к выбросам и взрывам. Таким образом, еще до промерзания в распределении газа наблюдаются значительные неоднородности. Эпигенетическое промерзание грунтов, особенно субаквальных осадков, является мощным фактором перераспределения и концентрации приповерхностных грунтовых газов. Газонасыщение мерзлых грунтов варьируется в больших диапазонах: от незначительного, когда газовая пористость составляет 5 – 7% [1], 4 – 5% [10], а содержание газа составляет порядка 0.005 см³/г, до очень большого, когда газосодержание составляет 0.5 см³/г, а количество газа превышает свободную пористость на 2 – 3 порядка [14], при этом показатель пористости может достигать 50% [1]. Если в первом случае газ при увеличении температуры мерзлого грунта начинает перемещаться даже без нагрузки, то во втором давление в нем настолько большое, что может приводить к катастрофическим выбросам из скважин или формированию взрывных воронок газового выброса.

Рассмотрим некоторые оценки величин давлений, зафиксированных в мерзлых породах, и возможные причины их формирования. В 1986–1990 гг. на полуострове Ямал при бурении массива

мерзлого грунта в районе мостового перехода через р. Юрибей с глубины 26 м произошел выброс бурового инструмента весом около 150 кг на высоту 12 м. По расчетам Р.Г. Кальбергенцова (устное сообщение), необходимое давление составляло 2.5 МПа. Согласно расчетам В.И. Богоявленского и И.А. Гарагаша [2], для разрушения мерзлой покрышки воронки газового выброса “Ямальский кратер” мощностью 8 м достаточно давления в 1.25 МПа. Близкие значения (1.74 МПа) были получены В.П. Мерзляковым [27]. По оценкам С.Н. Булдовича [29], давление 1.5 МПа и температур ниже -1.4°C достаточно для образования стабильных углекислых газогидратов. Это означает, что повышение температуры выше данных значений приведет к разложению газогидрата и формированию соответствующих давлений углекислого газа в толще мерзлых пород. Для метана при температурах в диапазоне от -5°C до 0°C равновесное давление в системе газ–вода (лед)–гидрат находится в диапазоне 2.2 – 2.6 МПа [7]. То есть максимально возможное давление при разложении газогидрата метана будет находиться около 2.6 МПа. Для Бованенковского НГКМ установлено, что объем выделившихся газов в горизонтах активного газовыделения на 2 – 3 порядка превосходит пространство в порах пород, которое газ мог занимать в свободной форме [24]. Используя известные соотношения давлений и объемов газа (закон Бойля Мариотта), можно определить, что давление газа в порах должно достигать значений 2 – 3 МПа, это вполне соответствует предположениям, что он находился в клатратной форме.

Каких-либо классификаций мерзлых пород, которые основывались бы на оценке газовой составляющей, к настоящему времени не разработано. В качестве предварительного предположения можно рассмотреть 3 группы насыщенных углеводородными газами мерзлых пород, в которых основным компонентом является метан. Эти группы выделены по степени газонасыщенности мерзлых пород и форме нахождения газовой составляющей.

В *первую группу* входят отложения, в которых наблюдается фоновое распределение газа перед промерзанием. В глинисто-суглинистых отложениях свободный газ содержится в диспергированной форме (в виде отдельных пузырьков в пористом пространстве). В песчаных образованиях он встречается в виде локализованных скоплений [20]. Значительного перераспределения газовой составляющей в ходе промерзания и ее криогенной концентрации не происходит. Газонасыщенность мерзлых пород составляет не более 5% объема порового пространства. Газ находится в свободной форме в виде зашемленного в грунтовых порах и капиллярах. Давление газа соответствует гидростатическому. При повышении температу-

ры мерзлых пород выше -3°C возможны перераспределение и фильтрация газа без нагрузки. При нагрузках фильтрация газа начинается при более низких температурах.

Во *вторую группу* входят мерзлые породы, в которых газонасыщенность достигает 50% и более. Газ может находиться под давлением больше гидростатического, но менее 2.5 МПа. В этих условиях он в свободной форме рассеян по грунтовому массиву или сконцентрирован в “газовых карманах”. При повышении температуры возможны напорная фильтрация газа, развитие деформаций и уменьшение прочностных характеристик мерзлых пород, что может приводить к уплотнению мерзлых пород и осадкам инженерных сооружений. При вскрытии пород в процессе бурения могут происходить выбросы газа, объемы которого определяются величиной их газонасыщенности.

В *третью группу* входят мерзлые породы, где газ находится в клатратной форме в метастабильном состоянии. В предшествующий период эти газонасыщенные породы проходили этап развития, когда создавались условия гидратообразования, т.е. определенные соотношения температур и давлений. Источниками соответствующих давлений могли быть ледниковые покровы, достаточно глубокое залегание морских осадков или промерзание в условиях криогенных напоров. В ненарушенном состоянии газ в твердой форме соответствует ледяным образованиям мерзлой толщи, аномальных давлений при этом не наблюдается. При снятии давления или повышении температуры мерзлых пород может наблюдаться разложение газогидратов. При этом создается давление около 2.5 МПа, которое приводит к интенсивной фильтрации газа.

Газогидраты могут выходить из стабильного состояния и начать разлагаться при увеличении минерализации поровых растворов мерзлых пород. Данный процесс связан с тем, что при промерзании засоленных осадков происходит отжатие солей из зоны льдообразования. При наличии песчаных слоев отжатые соли накапливаются в них, формируя криопэги. При повышении температуры мерзлых пород толщина пленок связанной воды с меньшей концентрацией солей увеличивается, ионы солей за счет диффузии мигрируют в мерзлый грунт. Интенсивность миграции ионов химических элементов в мерзлых грунтах зависит от их температуры, состава отложений, градиента концентрации [23]. Взаимодействие содержащихся в мерзлых отложениях газогидратов с растворами солей приводит к их разложению. Установлено, что в процессе переноса и накопления солей формируются два фронта: протавивания мерзлых отложений и разложения газогидратов. При этом фронт разложения газо-

гидрата опережает фронт оттаивания [30]. То есть газогидраты начнут разлагаться и выделять свободный газ под большим давлением еще до оттаивания мерзлой породы.

Влияние свободного газа на физико-механические свойства грунтов проявляется по-разному. Там, где имеются условия для формирования аномально высоких давлений, характерна тенденция к разупрочнению, уменьшению плотности и прочности при одновременном повышении пористости, текучести и сжимаемости (разупрочнение). Это происходит в случае наличия покрышек, перекрывающих газонасыщенную толщу. При вскрытии таких интервалов газ улетучивается, пластовое давление падает, что и вызывает разупрочнение грунта. В газонасыщенных горизонтах, не экранированных слабопроницаемыми слоями, давление газа незначительно отличается от гидростатического. При вскрытии этих интервалов скважинами существенного снижения давления не происходит и, соответственно, свойства грунтов изменяются лишь в зависимости от вещественного состава и степени диагенетических преобразований [20].

Изменения внешних факторов, определяющих состояние грунтового массива, могут приводить к тому, что газ выходит из стабильного состояния и начинает перераспределяться внутри мерзлой породы. К таким факторам относятся повышение отрицательных температур до значений, близких к значениям фазовых переходов; уменьшение давлений ниже давлений, обеспечивающих стабильное существование газогидратов; увеличение минерализации поровых растворов, приводящее к разложению газогидратов. При переходе в нестабильные состояния свойства мерзлых пород меняются. Резко усиливается фильтрация газов, возрастает пористость, возникают разрывные и пластические деформации, в грунтовом массиве на локальных участках возможно течение мерзлого грунта и даже пневматические взрывы газа.

Например, на некоторых газовых скважинах Бованенковского и Харасавэйского НГКМ отмечается увеличение сжимаемости многолетне-мерзлых пород при повышении их температуры без перехода через границу оттаивания. Это повлекло за собой развитие деформаций грунтового основания с риском перехода в недопустимое состояние. Отмечается, что добывающие предприятия в Арктическом регионе ранее не сталкивались с данным процессом [16]. Можно обоснованно допустить, что возникновение просадок при повышении температуры газонасыщенных мерзлых пород, широко распространенных на данных территориях, может быть связано с выдавливанием газа из зоны воздействия инженерных сооружений. Гораздо большие негативные последствия

наблюдаются при фомировании высоких давлений внутригрунтовых газов в мерзлых толщах. В этих случаях при бурении наблюдаются интенсивное газовыделение и даже взрывные процессы.

В заключение следует выделить основные направления изучения влияния газа на механические свойства мерзлых грунтов:

- выявление условий генерации и накопления газов до промерзания и в процессе промерзания;
- изучение морфологии газовых включений в зависимости от газонасыщенности;
- анализ взаимосвязи величин газонасыщения, возникающих давлений и процессов деформирования при повышении температуры мерзлых пород;
- лабораторные исследования влияния газов на механические свойства мерзлых пород с учетом возможности их фильтрации.

При лабораторных испытаниях мерзлых грунтов следует учитывать то, что газ в них может находиться под давлением. По-видимому, в ходе лабораторных испытаний работы следует проводить в 2 режимах: с возможностью оттока газа и без такой возможности. В первом случае необходимо фиксировать динамику выделения газа и увязывать ее с показателями механических характеристик мерзлых грунтов.

ВЫВОДЫ

1. К настоящему времени влияние газообразной составляющей на поведение мерзлых пород при воздействии на них различных силовых нагрузок изучено недостаточно.

2. Существуют критические зоны температур, давлений, минерализации порового раствора, которые приводят к нарушению термодинамического равновесия. Даже при незначительной газонасыщенности нахождение мерзлых грунтов в этих зонах может приводить к ухудшению их механических характеристик и, как следствие фильтрации газа, деформациям, просадкам.

3. Механические характеристики газонасыщенных грунтов могут меняться в зависимости от того, происходит отток газа или нет. В ходе лабораторного изучения влияния газа на механические свойства мерзлых пород необходимо это учитывать.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // Криосфера Земли. 1998. Т. II. № 4. С. 42–50.
2. Богоявленский В.И., Гарагаш И.А. Обоснование процесса образования кратерогазового выброса в Арктике математическим моделированием // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 12–17.
3. Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков Г.И. и др. Газохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разведка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 5. С. 22–34.
4. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. К вопросу о механизме выхода пузырьков метана из торфяника // ДОСйГИК. 2012. Т. 3. № 3. С. 54–63.
5. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–47.
6. Дурмишьян А.Г. Значение аномально высоких пластовых давлений при поиске газовых и газоконденсатных залежей // Газовая промышленность. 1961. № 7. С. 1–3.
7. Истомин В.А., Чувилин Е.М., Сергеева Д.В., Буханов Б.А. и др. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах // НефтеГазоХимия. 2018. № 2. С. 33–42.
8. Кальбергенов Р.Г., Карпенко В.С., Кутергин В.Н., Собин Р.В. Влияние газовой компоненты на свойства мерзлых грунтов и динамика ее выделения при изменении температуры // Матер. 5-й конференции “День науки 2020”. М.: “КДУ”, “Добросвет”. 2020. С. 10–17. [электронное издание сетевого распространения].
9. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Котов П.И., Собин Р.В. Динамика выделения газа из мерзлых грунтов при изменении температуры и давления // Строительство на многолетнемерзлых грунтах. 2020. № 4. С. 15–20.
10. Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Р. Собин Р.В. Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 70–79.
11. Краев Г.Н., Шульце Э.Д., Ривкина Е.М. Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // ДАН. 2013. Т. 451. № 6. С. 684–687.
12. Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. № 3. С. 173–184.
13. Краснов И.И. Газы четвертичной толщи предглинтовой полосы Ленинградской области // Природные газы СССР. М.–Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935.

14. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения М.: ООО "Газпром Экспо", 2013. 424 с.
15. Мельников П.И., Мельников В.П., Царев В.П., Дегтярев Б.В. и др. О генерации углеводородов в толщах многолетнемерзлых пород // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1989. № 2. С. 118–128.
16. Мельников И.В., Нерсесов С.В., Осокин А.Б., Николайчук Э.В. и др. Геотехнические решения для строительства газовых скважин в особо сложных геокриологических условиях полуострова Ямал // Газовая промышленность. 2019. № 12. С. 64–71.
17. Обжиров А.И. Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука, 1993. 139 с.
18. Обжиров А.И., Телегин Ю.А., Окулов А.К. Газогеохимические поля и распределение природных газов в дальневосточных морях // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1 (25). С. 66–74.
19. Портнов А.Д., Семенов П.Б., Рекант П.В. Комплекс высокочастотных сейсмоакустических исследований и морской газо-геохимической съемки как метод обнаружения и локализации углеводородов // Геология морей и океанов: матер. XIX Междунар. научной конф. (школы) по морской геологии. 2011. Т. II. М.: ИО РАН, С. 97–100.
20. Рокос С.И. Газонасыщенные отложения верхней части разреза Баренцево-Карского шельфа: автореф. дис. канд. геогр. н. Мурманск, 2009. 21 с.
21. Руденко Н.С. К вопросу о биохимическом газообразовании в подземном пространстве Санкт-Петербурга // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 1. С. 101–107.
22. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов на шельфе Восточно-арктических морей как потенциальная причина метановой катастрофы: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 1. С. 1132–1137.
23. Смирнова О.Г. Миграция ионов химических элементов в мерзлых породах и льдах: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. н. М., 1997. 23 с.
24. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.
25. Сутин И.А., Финн Г.Р., Зеленская Л.Н. Микробиология. М.: Медицина, 1973. 368 с.
26. Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. М.: Недра, 1985. 288 с.
27. Хименков А.Н., Власов А.Н., Брушков А.В., Кошурников А.В. и др. Геосистемы газонасыщенных многолетнемерзлых пород. М.: Геоинфо, 2021. 288 с.
28. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.
29. Buldovich S., Khilimoniyuk V., Bychkov A., Ospennikov E. et al. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling // Proc. 5th European Conference On Permafrost. Book of Abstracts, 23 June–1 July 2018, Chamonix, France. P. 97–98.
30. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin S. et al. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling // Geosciences. 2019. V. 9 (4), P. 188. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040188>

APPROACHES TO STUDYING THE EFFECT OF GAS COMPONENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FROZEN SOILS

A. N. Khimenkov^{a,#}, E. O. Dernova^{a,##}, and Yu. V. Stanilovskaya^{b,###}

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

^b *Total Energies, Lesnaya ul., 7, Moscow, 125196 Russia*

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

^{##} *E-mail: dernova.eo@gmail.com*

^{###} *E-mail: yulia.stanilovskaya@total.com*

Studies of recent decades have shown that the gas component plays a significant role in the structure and properties of frozen soils. This is indicated by a significant influx of greenhouse gases into the atmosphere from the permafrost; gas emissions leading to accidents at boreholes; the formation of gas emissions craters, etc. These processes are determined by the mutual influence between the characteristics of the gas component and the indicators of the physical and mechanical properties of frozen soils, which have not been studied enough to date. The formation mechanisms of gas-saturated zones are considered; the influence of gas on the physical and mechanical properties of thawed and frozen soils is assessed; and the processes associated with the impact of gas on the soil massif are analyzed.

Keywords: *gas-saturated permafrost, cryogenic concentration, rupture deformations, plastic deformations, gas channels, gas filtration, gas traps, gas hydrate dissociation, pressure gas filtration*

REFERENCES

1. Are, F.E. *Problema emissii glubinykh gazov v atmosferu* [The problem of deep gas emission to the atmosphere]. *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. II, no. 4, pp. 42–50. (in Russian)
2. Bogoyavlenskii, V.I., Garagash, I.A. *Obosnovanie protsessy obrazovaniya kraterov gazovogo vybroso v Arktike matematicheskim modelirovaniem* [Substantiation of the formation of gas-ejection craters in the Arctic by mathematical modeling]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 3 (19), pp. 12–17. (in Russian)
3. Bondarev, V.L., Mirotvorskii, M.Yu., Oblekov G.I. et al. *Gazokhimicheskaya kharakteristika nadsenomanskikh otlozhenii poluostrova Yamal (na primere Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya)* [Gas and chemical characteristics of above Cenomanian Senoman deposits in the Yamal Peninsula (by the example of Bovanenkovo oil and gas condensate field)]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2008, no. 5, pp. 22–34. (in Russian)
4. Glagolev, M.V., Kleptsova, I.E. *K voprosu o mekhanizme vykhoda puzyr'kov metana iz torfyanykh* [On the issue of the mechanism of release of methane bubbles from a peat bog]. *DOSiGIK*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 54–63. (in Russian)
5. Dashko, R.E., Aleksandrova, O.Yu., Kotyukov, P.V., Shidlovskaya, A.V. *Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh uslovii Sankt-Peterburga* [Peculiarities of engineering geological conditions of St. Petersburg]. *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2011, no. 1, pp. 1–47. (in Russian)
6. Durmish'yan, A.G. *Znachenie anomal'no vysokikh plastovykh davlenii pri poiske gazovykh i gazokondensatnykh zalezhei* [Importance of abnormally high reservoir pressures in the search for gas and gas condensate deposits]. *Gazovaya promyshlennost'*, 1961, no. 7, pp. 1–3. (in Russian)
7. Istomin, V.A., Chuvilin, E.M., Sergeeva, D.V., Bukhanov, B.A. et al. *Vliyanie komponentnogo sostava i davleniya gaza na l'do- i gidratoobrazovanie v gazonasyshchennykh porovykh rastovarkh* [Effect of gas component composition and pressure on ice and hydrate formation in gas-saturated pore solutions]. *Neftegazokhimiya*, 2018, no. 2, pp. 33–42. (in Russian)
8. Kal'bergenov, R.G., Karpenko, V.S., Kutergin, V.N., Sobin, R.V. *Vliyanie gazovoi komponenty na svoystva merzlykh gruntov i dinamika ee vydeleniya pri izmenenii temperatury* [Influence of the gas component on the properties of frozen soils and the dynamics of its release with temperature change]. Proc. 5th conference "Science Day 2020". Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2020, pp. 10–17. (in Russian)
9. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin, R.V. *Dinamika vydeleniya gaza iz merzlykh gruntov pri izmenenii temperatury i davleniya* [Dynamics of gas release from frozen soils under temperature and pressure changes]. *Stroitel'stvo na mnogoletnemerzlykh gruntakh*, 2020, no. 4, pp. 15–20. (in Russian)
10. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., Sobin, R.V. *Vliyanie na prochnost' glinistykh gruntov izmenenii svoystv gidratnykh plenok pri temperaturnykh vozdeistviyakh* [Influence of changes in the properties of hydrated films on the strength of clay soils under temperature influences]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 70–79. (in Russian)
11. Kraev, G.N., Schulze, E.D., Rivkina, E.M. *Kriogeneza kak faktor raspredeleniya metana v gorizontakh merzlykh porod* [Cryogenesis as a factor of methane distribution in the horizons of frozen rocks]. *Doklady Akademii Nauk*, 2013, vol. 451, no. 6, pp. 684–687. (in Russian)
12. Kraev, G.N., Rivkina, E.M. *Nakoplenie metana v promerzayushchikh i merzlykh pochvakh kriolitozony* [Accumulation of methane in freezing and frozen soils of the permafrost zone]. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 173–184. (in Russian)
13. Krasnov, I.I. *Gazy chetvertichnoi tolshchi predglintovoi polosy Leningradskoi oblasti* [Gases of the Quaternary strata in the pre-glint zone of the Leningrad region]. *Prirodnye gazy SSSR* [Natural gases of the USSR]. Moscow-Leningrad, ONTI NKTP USSR Publ., 1935. (in Russian)
14. *Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal. T.2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field]. Moscow, OOO Gazprom Expo, 2013, 424 p. (in Russian)
15. Mel'nikov, P.I., Mel'nikov, V.P., Tsarev, V.P., Degtyarev, B.V., et al. *O generatsii uglevodorodov v tolshchakh mnogoletnemerzlykh porod* [On the generation of hydrocarbons in strata of permafrost rocks]. *Izvestiya AN SSSR, Seriya geologicheskaya*, 1989, no. 2, pp. 118–128. (in Russian)
16. Melnikov, I.V., Nersesov, S.V., Osokin, A.B., Nikolai-chuk, E.V., et al. *Geotekhnicheskie resheniya dlya stroitel'stva gazovykh skvazhin v osobo slozhnykh geokriologicheskikh usloviyakh poluostrova Yamal* [Geotechnical solutions for the construction of gas wells in especially difficult geocryological conditions of the Yamal Peninsula]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2019, no. 12, pp. 64–71. (in Russian)
17. Obzhairov, A.I. *Gazogeokhimicheskie polya pridonnogo sloya morei i okeanov* [Gas geochemical fields of the bottom layer of seas and oceans]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 139 p. (in Russian)
18. Obzhairov, A.I., Telegin, Yu.A., Okulov A.K. *Gazogeokhimicheskie polya i raspredelenie prirodnnykh gazov v dal'nevostochnykh moryakh* [Gas geochemical fields and distribution of natural gases in the Far Eastern seas]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2018, no. 1 (25), pp. 66–74. (in Russian)
19. Portnov, A.D., Semenov, P.B., Rekant, P.V. *Kompleks vysokochastotnykh seismoakusticheskikh issledovaniy i morskoi gazo-geokhimicheskoi s'emki kak metod obnaruzheniya i lokalizatsii uglevodorodov* [A complex of high-frequency seismoacoustic studies and marine gas-geochemical survey as a method for detecting and localizing hydrocarbons]. // *Geology of Seas and Oceans: Proc. XIX Int. Sci. Conf. (School) in Marine Geology*. 2011, Moscow, IO RAN Publ., pp. 97–100. (in Russian)
20. Rokos, S.I. *Gazonasyshchennyye otlozheniya verkhnei chasti razreza Barentsovo-Karskogo shel'fa* [Gas-saturated sediments of the upper part of the Barents-Kara

- shelf section]. Extended abstract Cand. Sci. (Geogr.) Diss., Murmansk, 2009. 21 p. (in Russian)
21. Rudenko, N.S. *K voprosy o biokhimicheskom gazoobrazovanii v podzemnom prostranstve Sankt-Peterburga* [On the issue of biochemical gas formation in the underground space of St. Petersburg]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2000, no. 1, pp. 101–107. (in Russian)
 22. Sergienko, V.I., Lobkovskii, L.I., Semiletov, I.P. *Degradatsiya podvodnoi merzloty i razrushenie gidratov na shel'fe Vostochno-Arkticheskikh morei kak potentsial'naya prichina metanovoi katastrofy: nekotorye rezultaty kompleksnykh issledovaniy 2011 goda* [Degradation of underwater permafrost and destruction of hydrates on the shelf of the East Arctic seas as a potential cause of a methane catastrophe: some results of comprehensive studies in 2011]. *Doklady Akademii nauk*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 1132–1137. (in Russian)
 23. Smirnova, O.G. *Migratsiya ionov khimicheskikh elementov v merzlykh porodakh i l'dakh* [Migration of ions of chemical elements in frozen rocks and ice]: Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss., Moscow, 1997, 23 p. (in Russian)
 24. *Stroenie i svoistva porod krilitozony yuzhnoi chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Structure and properties of rocks in the permafrost zone of the southern part of the Bovanenkovo gas condensate field]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 137 p. (in Russian)
 25. Sutin, I.A., Finn, G.R., Zelenskaya, L.N. *Mikrobiologiya* [Microbiology]. Moscow, Meditsina Publ., 1973, 368 p. (in Russian)
 26. *Teoreticheskie osnovy inzhenernoi geologii. Fiziko-khimicheskie osnovy* [Theoretical foundations of engineering geology. Physicochemical bases]. E.M. Sergeev, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1985. 288 p.
 27. Khimenkov, A.N., Vlasov, A.N., Brushkov, A.V., Koshurnikov, A.V. et al. *Geosistemy gazonasyschennykh mnogoletnemerzlykh porod* [Geosystems of gas-saturated permafrost rocks]. Moscow, Geoinfo Publ., 2021. 288 p.
 28. Yakushev, V.S. *Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone* [Natural gas and gas hydrates in the permafrost zone]. Moscow, VNIIGAZ Publ., 2009, 192 p. (in Russian)
 29. Buldovich, S., Khilimonyuk, V., Bychkov, A., Oспенников, E. et al. Cryogenic hypothesis of the Yamal crater origin Results of detailed studies and modeling // Proc. 5th European Conference On Permafrost. Book of Abstracts, 23 June – 1 July 2018, Chamonix, France, pp. 97–98.
 30. Chuvilin, E., Ekimova, V., Bukhanov, B., Grebenkin, S. et al. Role of salt migration in destabilization of intra permafrost hydrates in the Arctic shelf: experimental modeling. *Geosciences*, 2019, vol. 9 (4), pp. 188.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504.05

СИСТЕМА ОЦЕНКИ И ОХРАНЫ КОМПОНЕНТОВ ГЕОСРЕДЫ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

© 2023 г. К. Л. Чертес^{1,*}, О. В. Тупицына^{1,**}, Е. Н. Петренко^{1,***}

¹ ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». (ФГБОУ ВО «СамГТУ»),
ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100 Россия

*E-mail: chertes2007@yandex.ru

**E-mail: olgatupicyna@yandex.ru

***E-mail: SHN.007@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 26.11.2022 г.

В статье рассматриваются результаты исследования техногенных залежей углеводородов в составе природно-техногенных систем. Особенностью указанных объектов является их размещение в геологической среде под площадками действующих и заброшенных предприятий нефтяной отрасли, выступающих источниками поступления нефтепродуктов в геологическую среду. Техногенные залежи углеводородов интерпретируются как сложные, динамические, многокомпонентные системы, подверженные влиянию паводково-меженных явлений на близлежащих поверхностных водных объектах. На основании анализа фондовых данных и результатов полевых обследований указанных объектов предлагается комплексная экологическая система их оценки, включающая в себя группы параметров, такие как геометрическая, технологическая, геоэкологическая, ресурсно-экономическая и инерционно-колебательная. Предлагается к применению схема проведения комплекса работ по исследованию, оценке, моделированию, ликвидации техногенных залежей, учитывающая их дуальную природу: с одной стороны, залежи оказывают негативное воздействие на окружающую среду, с другой — обладают ресурсным потенциалом как вторичный материальный ресурс. Предлагаемая комплексная система оценки позволяет определить текущее состояние техногенной залежи в составе природно-техногенной системы, выбрать и обосновать технологические решения для ее ликвидации и восстановления нарушенных компонентов окружающей среды в зоне ее влияния.

Ключевые слова: техногенная залежь углеводородов, техногенное месторождение, ликвидация техногенных залежей, оценка техногенных залежей, охрана окружающей среды

DOI: 10.31857/S0869780923010034, EDN: HSKUPL

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической устойчивости природно-техногенных систем является важной научно-практической задачей. Примером такой системы является геологическая среда, включающая в себя техногенную залежь углеводородов. Актуальной проблемой выступает создание комплексной системы оценки и охраны компонентов геосреды от техногенных воздействий залежей углеводородов.

Линзы нефтепродуктов формируются в толще пород и на поверхности подземных вод в результате аккумуляции утечек нефтесодержащих жидкостей [4]. Поллютанты трансформируются под влиянием факторов природной среды, мигрируют сквозь геологические элементы и оказывают негативное воздействие на компоненты окружающей среды: почвы, грунты, подземные воды, а

также поверхностные воды, являющиеся областями разгрузки [8]. Потенциальными объектами, инициирующими формирование залежей, являются: природные месторождения нефти в процессе их разработки, магистральные трубопроводы, нефтеперерабатывающие заводы, нефтебазы и объекты размещения нефтесодержащих отходов. По состоянию на октябрь 2021 г. на территории России официально действуют 37 нефтеперерабатывающих заводов, более 200 крупных нефтебаз и более 2000 разрабатываемых месторождений [6, 7, 10]. Многие из известных техногенных залежей углеводородов находятся в зоне влияния перечисленных объектов [1–3, 5, 9, 12].

В связи с тем, что на сегодняшний день отсутствует единый подход к исследованию, ликвидации и обращению с природно-техногенными системами, включающими техногенные залежи,

для комплексного обращения с указанными объектами требуется создание инструмента оценки и системы выбора технологических решений для их ликвидации.

Объектом настоящего исследования является техногенная залежь углеводородов в составе природно-техногенных систем. Изучаемая природно-техногенная система включает в себя природные и техногенные элементы. К техногенным составляющим относятся: собственный залежь углеводородов; предприятие, являющееся источником поступления углеводородов в геосреду; сеть наблюдательных и эксплуатационных скважин. Дополнительно могут рассматриваться водозаборные скважины, сооружения инженерной защиты. Природными элементами являются подземные и поверхностные воды, геологическая среда [11].

Целью исследования являлось создание комплексной системы оценки техногенных залежей углеводородов и системы выбора технологий их ликвидации и снижения негативного воздействия на геологическую среду.

Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие задачи:

- анализ существующих методов оценки состояния техногенных залежей углеводородов и мероприятий по восстановлению территорий, подверженных их негативному влиянию;
- разработка комплексной системы оценки техногенной залежи углеводородов как элемента ПТС и объекта негативного воздействия на геологическую среду, обладающего ресурсным потенциалом;
- создание системы выбора методов, технологических решений охраны и восстановления геосреды, нарушенной техногенными залежами.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В основе настоящего исследования лежат следующие исходные данные: научные источники, фондовые материалы и открытые данные профильных организаций и министерств, территориального фонда геологической информации, нормативные документы по ведению мониторинга и обращению с техногенными залежами и объектами-аналогами. В качестве ближайших объектов-аналогов рассматривались природные месторождения нефти и месторождения подземных вод [6]. Кроме перечисленного проводились изыскания одной из техногенных залежей углеводородов в Самарской области. Полученные в ходе собственных исследований результаты сопоставлялись с имеющимися в доступе материалами по другим залежам.

В рамках исследования проведен системный анализ результатов собственных и фондовых материалов Территориального фонда геологической

информации и других источников для определения как уже имеющихся, так и предлагаемых авторами параметров (например, эффективные радиус и глубина залежи, амплитуда, частота, фаза и период колебаний в системе “залежь—область разгрузки”).

Инструментами оценки техногенных залежей в составе природно-техногенных систем выступили методы статистической обработки с использованием современного программного обеспечения, а также цифрового моделирования в программных комплексах Surfer (Golden Software) и Petrel (Schlumberger). В ходе работ по созданию цифровых моделей техногенной залежи углеводородов была уточнена методическая составляющая, учитывающая различия геологических, гидрогеологических и т.д. условий залегания традиционных месторождений нефти и объекта исследования.

Отбор и анализ проб компонентов окружающей среды (грунты, подземные и поверхностные воды, а также углеводороды залежи) проводили в соответствии с актуальными и утвержденными методиками с использованием современного оборудования.

В составе собственных полевых работ осуществлялось измерение уровней водного и углеводородного слоев в скважинах наблюдательной сети с помощью межфазной рулетки Solinst 122 (CSA) Interfase Meter. Частота измерений составляла от 1 до 3 раз в месяц и учитывала особенности гидрологического режима в поверхностном водном объекте, находящемся в зоне влияния объекта исследования. Все полученные значения сопоставлялись с результатами исследований профильных организаций, ведущих мониторинг на территории исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе результатов изысканий одной из залежей России, а также анализа фондовых материалов по более чем 50 подобным объектам, в том числе находящимся за рубежом, были определены значения их состояний, определяющие дальнейшее обращение с ними. Часть из них представлена в табл. 1.

В табл. 2 представлены группы критериев и параметров, предлагаемые для оценки техногенной залежи. Кроме известных показателей, таких как величина имеющихся запасов, геологическое строение, содержание углеводородов в почвах, грунтах, поверхностных и подземных водах, авторами введены понятия эффективный радиус, определяющий зону влияния объекта; эффективная глубина, являющаяся граничным фактором применения технологий. В качестве критерия предлагается количество хранящихся единовре-

Таблица 1. Характеристики наиболее изученных техногенных залежей

Территориальная принадлежность	Ландшафтный тип	Ориентировочные запасы, тыс. т	Нэфф, м	Кэфф, км	Источник утечек	Возраст, лет	Преобладающий тип пород коллектора и Кф (см/с)	Ключевые компоненты загрязнителя	Область разгрузки
Среднее Поволжье	Пойменно-склоновый	1500 ± 200	≤80	15.0 ± 1.0	Резервуарный парк, коммуникации	70 ± 5	Карбонатные (≤10 ⁻⁵)	Этил. бензин	Два водотока, далее водохранилище
Среднее Поволжье	Пойменно-террасный	150 ± 30	≤50	~3.0 ± 0.5	— “ —	80 ± 5	Карбонатные (≤10 ⁻⁵)	Дизтопливо	Водоток, далее старца
Среднее Поволжье	Водораздельный	400 ± 20	≤25	~5.0 ± 1.0	Резервуарный парк, коммуникации, оборудование	75 ± 5	Глинистые (≤10 ⁻⁶)	Дизтопливо, мазут	Водоток, далее водохранилище
Среднее Поволжье	Пойменно-склоновый	50 ± 10	≤25	~0.5 ± 0.5	Резервуарный парк,	60 ± 5	Суглинистые (≤10 ⁻⁷)	Хром, фенол	Водохранилище
Среднее Поволжье	Водораздельный	100 ± 20	≤30	~1.0 ± 0.5	Нефтешламо-накопитель	50 ± 5	Суглинистые (≤10 ⁻⁷)	Сера	Два водотока
Среднее Поволжье	— “ —	50 ± 10	≤35	~1.5 ± 0.5	Шламовые амбары	60 ± 5	Глинистые (≤10 ⁻⁶)	Этил.бензин, сера	Два водотока
Краснодарский край	Надпойменно-террасный	100 ± 10	≤10	~5.0 ± 0.5	Резервуарный парк, оборудование	85 ± 5	Галечно-песчаные (≥10 ⁻³)	Нафта, дизтоп.	Водоток, море
Ростовская область	— “ —	2 ± 0.5	≤5	~0.5 ± 0.1	— “ —	15 ± 5	Глинисто-песчаные (≥10 ⁻⁴)	Бензин, дизтопливо	Два водотока
Московская область	— “ —	10 ± 2	≤15	~1.0 ± 0.5	Резервуарный парк	65 ± 5	Песчано-глинистые (≥10 ⁻⁴)	Бензин, дизтопливо, тяжелые металлы	Водоток, далее малое водохранилище
Московская область	— “ —	15 ± 3	≤35	~1.0 ± 0.5	— “ —	80 ± 5	Смешанные породы	Авиац.бенз., битум	Водоток
Саратовская область	— “ —	2000 ± 200	≤15	10.0 ± 1.0	Резервуарный парк, накопители	70 ± 5	Карбонатно-глинистые (≤10 ⁻⁵)	Бенз., дизтоп., мазут	Водоток, водохранилище
Республика Коми	— “ —	1000 ± 100	≤50	5.0 ± 1.0	Резервуарный парк, накопители, коммуникации	80 ± 5	Смешанные породы	Бензин, дизтопливо	Ручей в овраге, далее водоток
Иркутская область	Пойменно-террасный	1000 ± 100	≤100	5.0 ± 1.0	Резервуарный парк, оборудование	60 ± 5	Смешанные породы	Дизтопливо, мазут	Один водоток, водохранилище

Таблица 2. Группы критериев и параметров для оценки техногенной залежи

Характеристика	Усл. обозн.	Ед. изм.	Значения (диапазон)				Примечание	
Геометрическая группа								
Эффективный радиус	R _з	км	<1		>1		Расстояние от источника утечек до наиболее удаленной точки, в которой обнаружено загрязнение	
Эффективная глубина	H _з	м	<10		>10		Определяет способ реабилитации загрязненной геосреды	
Эффективная толщина	Δ	м	<10		>10		Расстояние от зеркала залежи до поверхности регионального водоупора	
Технологическая группа								
Тип области разгрузки подземных вод	—	—	—				Определяет выбор технологии геоинженерной защиты	
Соотношение свободных и заземленных н/п	N _{св/защ}	—	<1		>1		Определяет необходимость применения технологий структурно-фазового перераспределения	
Соотношение концентраций н/п в жидкой и твердой фазах	N _{ж/тв}	—	<1		>1			
Геоэкологическая группа								
Степень опасности геосреды	Z	—	10	100	1000	10000	Определяет токсичность жидкого флюида и степень загрязненности грунтов	
Категория защищенности подземных вод	Y _{зпв}	—	1—6				Определяет необходимость экранирования фрагментов геосреды от загрязнения “сверху” и “снизу”	
Концентрация нефтепродуктов в компонентах ОС	C _{н/п}	ПДК	<ПДК		>ПДК		Определяет соответствие компонентов геосреды региональным нормативам или ПДК	
Коэффициент фильтрации	k _ф	см/с	<10 ^{−5} ; >10 ^{−5}				Определяет тип коллектора по фильтруемости загрязнений	
Площадь нарушенной территории	S	км ²	<1; >1				Определяет площадь воздействия на сопряженные компоненты ОС	
Ресурсно-экономическая группа								
Количество и категория утвержденных запасов	V _з	млн т	1	5	30	300	1000	Определяет величину месторождения и его потенциал дальнейшей разработки
Дебит залежи	Q _з	т/сут	1			2		Определяет производительность сооружений по откачке вторичного ресурса и его подготовке
Среднее количество хранящихся единовременно УВ	V _{хран}	тыс. м ³	2	10	20	100		Определяет потенциал пополнения залежи сверху за счет потерь углеводородов в местах хранения
Ресурсный потенциал	RP= 3 _п + C + Y _{пр} + Θ _{эп} − 3 _{пер} − 3 _{трансп}						Определяет экономическую целесообразность добычи углеводородов и обращения с ним как с ресурсом	
Инерционно-колебательная группа								
Амплитуда	A	м	<2.5		>2.5		Определяется зарегулированностью регионального водохранилища (водотока I рода)	

Таблица 2. Окончание

Характеристика	Усл. обозн.	Ед. изм.	Значения (диапазон)			Примечание
Период	T	год	0.25	0.5	1	Определяется местными паводково-меженными условиями и согласуется с количеством паводков на ближайшем поверхностном водном объекте
Частота	f	1/год	4	2	1	
Задержка	Δt	сут	15; 30; 60			Позволяет оценить величину отклика уровней воды на подъем воды в водохранилище
Фаза	$\varphi = 2\pi\Delta t/T$	—	0.26; 0.52; 1.03; 2.06; 4.12			Значения предложены на основании анализа картографического и фондового материала по группам рассмотренных объектов, а также данных инженерных изысканий; определяется местными паводково-меженными условиями

менно углеводородов на предприятии-источнике с целью оценки количества ежегодно теряемых углеводородов, пополняющих залежь.

Актуальной проблемой является не только создание комплексной системы оценки техногенных залежей углеводородов, но и обращение с ними: ликвидация самой залежи и восстановление нарушенной геологической среды. В рамках проведенных исследований и анализа фондовых материалов, авторами предлагается схема последовательных этапов оценки, прогнозирования и

управления состоянием природно-техногенных систем, вмещающих техногенную залежь (рис. 1). Представленная схема исследований была апробирована при обследовании одной из техногенных залежей Самарской области и показала себя удовлетворительно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные в рамках исследования залежи отличаются по фильтрационным характеристикам



Рис. 1. Схема основных этапов оценки, прогнозирования и управления состоянием ПТС, вмещающей техногенную залежь.

пород геосреды-коллектора, качественному составу углеводородов, включая содержание ряда тяжелых металлов, геоморфологическому типу и гидрогеологическим условиям. Предлагаемые в табл. 2 группы критериев и параметров, а именно: геометрическая, технологическая, геоэкологическая, ресурсно-экономическая и инерционно-колебательная, позволяют в комплексе оценить состояние техногенной залежи углеводородов в составе природно-техногенной системы и определить граничные условия для выбора технологических решений.

Геометрическая группа определяет конфигурацию залежи и позволяет выявить ограничения к применению механических методов удаления загрязненного грунта, биологических методов. Сведения о контуре объекта исследования позволяют определить объемы работ по устройству дренажных систем и сооружений инженерной защиты прилегающих ненарушенных территорий с использованием стен в грунте, экранов.

Технологическая группа позволяет выбрать тип технологии с учетом жизненного цикла техногенной залежи. Так, присутствие углеводородов преимущественно в свободном состоянии допускает применение простых в обслуживании и эксплуатации гидродинамических методов извлечения нефтесодержащих эмульсий.

Определение типа области разгрузки в составе параметров технологической группы является неотъемлемой частью предлагаемой системы оценки, так как именно паводково-меженный режим поверхностных водных объектов служит причиной перемещения токсикантов и определяет поведение ПТС-залежи как динамической системы. Выявление приоритетных направлений движения залежи позволяет определить места размещения сооружений инженерной защиты, ограничивающих дальнейший трансфер загрязнений в ненарушенные фрагменты.

Геоэкологическая группа оценивает техногенную залежь углеводородов как источник существующего или перспективного ущерба окружающей среде и позволяет определить способности природных компонентов к самовосстановлению.

Параметры и критерии ресурсно-экономической группы отражают ресурсный потенциал залежи углеводородов как источника вторичных материальных ресурсов, а также экономическую целесообразность организации добычи нефтепродуктов из нее.

На основании полученных статистических данных об уровнях подземных вод и флотирующего на его поверхности слоя углеводородов, было выявлено, что поведение залежи определяется инерционными свойствами как колебательной системы. Описание техногенной залежи значениями инерционно-колебательной группы позво-

ляет предложить рациональные режимы и места добычи углеводородного сырья с учетом гидрологического режима объекта разгрузки подземных вод.

Таким образом, предлагаемая комплексная система оценки позволяет не только численно описать состояние залежи, но и определить рациональные методы локализации и ликвидации залежи углеводородов и последующего восстановления нарушенной геосреды.

Одним из результатов апробации комплексной системы оценки является выделение ресурсного и восстановительного этапов обращения с техногенными залежами в зависимости от качественного состава углеводородов, величины их запасов, формы залегания и совокупности условий геосреды. Ресурсный этап подразумевает извлечение свободных углеводородов, представляющих ресурсную ценность. Восстановительный этап представляет собой очистку или доочистку грунтов от нефтепродуктов до санитарных требований и региональных нормативов, а также локализацию загрязняющих веществ при необходимости, т.е. техногенная залежь углеводородов рассматривается как объект негативного воздействия на окружающую среду.

Представленная на рис. 1 схема этапов оценки, прогнозирования и управления состоянием природно-техногенной, вмещающей техногенную залежь была использована в ходе обследования одной из залежей Самарской области. Она позволила провести комплексные мониторинговые исследования, получить достаточное количество данных для создания цифровых моделей и статистической обработки, а также разработать комплексную систему оценки, применимую для подобных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и успешно апробирована система критериально-параметрической оценки состояния техногенных залежей углеводородов как элемента природно-техногенной системы на примере объектов в России и за рубежом.

2. Предлагаемая комплексная система оценки позволила определить граничные условия возможных методов обращения с залежами углеводородов, а также место и режим реализации этих методов.

3. На основании комплексной оценки состояния существующих техногенных залежей углеводородов выделены ресурсный и восстановительный этапы обращения с ними. Данные этапы учитывают качественный состав углеводородов, величину запасов и совокупность параметров геологической среды, их вмещающей.

4. Предложена и апробирована схема основных этапов оценки, прогнозирования и управления состоянием природно-техногенных систем, вмещающих техногенную залежь. Схема включает в себя этап обследования методами инженерных изысканий, оценку с использованием методов лабораторного и статистического анализа, трехмерного моделирования, стадию разработки и апробации технологии в лабораторных и промышленных условиях, а также этап управления состоянием природно-техногенной системой с учетом всех предыдущих стадий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмадова Х.Х., Махмудова Л.Ш., Мусаева М.А. Грозненские техногенные залежи углеводородов: история, добыча, переработка, экологические проблемы // В мире научных открытий. 2013. № 1.1 (37). С. 258–283.
2. Бабенко В.Д., Солодовников Ю.С., Карагодин Г.В. и др. Опыт создания и эксплуатации систем инженерной защиты подземных вод от загрязнения жидкими нефтепродуктами на промплощадках действующих предприятий нефтехимического комплекса // Сб. “Захист довкілля від антропогенного навантаження”. Харьков-Кременчуг, 1999. Вып. 1 (3). С. 95–100.
3. Богданович А.М. Опыт локализации и ликвидации нефтяного загрязнения на одном из предприятий нефтекомплекса // Разведка и охрана недр. 2005. № 11. С. 57–59.
4. Быков Д., Чертес К., Петренко Е., Тупицына О., Пыстин В., Подъячев А. Санация недр территории нефтеперерабатывающих заводов // Экология и промышленность России. 2019. № 23 (3). С. 9–13.
5. Галинуров И.Р. Оценка техногенных потоков углеводородов в поймах рек в зоне влияния нефтехимических предприятий (на примере Республики Башкортостан): автореф. дис. ... канд. тех. наук. Уфа, 2012. 24 с.: ил.
6. Карта нефтебаз ООО “Газпромнефть-Региональные продажи” [Электронный ресурс]. URL: <https://client.gpn-trade.ru/neftmap/> (дата обращения 15.10.2022)
7. Каталог объектов учета ГБЗ с данными сводного государственного реестра участков недр и лицензий и ГКМ. Российский Федеральный геологический фонд [Электронный ресурс]. URL: <https://rgf-gf.ru/bal/a/index.php> (дата обращения 31.10.2022)
8. Мазлова Е.А., Анурина Ю.А. Проблемы загрязнения подземных вод на ОАО “Московский НПЗ” и пути их решения // Известия РАЕН. Технологии нефти и газа. 2011. № 2. С. 43–49.
9. Островский Ю.В., Заборцев Г.М., Черноок В.А., Крестинин А.А. Комплексная рекультивация территории Павельцевской нефтебазы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 6. 210–219.
10. Реестр проектируемых, строящихся и введенных в эксплуатацию нефтеперерабатывающих заводов в Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/opendata/7705847529-reestrnpz> (дата обращения 11.10.2022)
11. Чертес К.Л., Штеренберг А.М., Петренко Е.Н. Оценка состояния и подходы к восстановлению геосреды нарушенной в результате хозяйственной деятельности // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14 (9). С. 1140–1157.
12. Meng X.S., Wu M.M., Chen H.H., Yue X., Tao S.Y. Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant // Huan Jing Ke Xue. 2020, Jan 8. V. 41 (1). P. 377–384. Chinese. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.201903142>. PMID: 31854940

ASSESSMENT AND PROTECTION OF GEOENVIRONMENT COMPONENTS FROM IMPACTS PRODUCED BY TECHNOGENOUS HYDROCARBON DEPOSITS

K. L. Chertes^{a, #}, O. V. Tupitsyna^{a, ##}, and E. N. Petrenko^{a, ###}

^a Samara State Technical University,
ul. Molodogvardeiskaya, 244, Samara, 443100 Russia

[#]E-mail: chertes2007@yandex.ru;

^{##}E-mail: olgatupicyna@yandex.ru

^{###}E-mail: SHN.007@mail.ru

The article presents the results of studies of technogenous hydrocarbon deposits - Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) bodies in technonatural systems. The specific feature of these bodies is their location in the geological environment beneath operating and abandoned oil industry enterprises. Enterprises are the sources of hydrocarbons in the geological environment. Light non-aqueous phase liquid bodies are interpreted as complex, dynamic, multicomponent systems, which are subject to the influence of flooding and low-water phenomena in the nearby surface water bodies. Based on the study of archive data and the results of field survey of these objects, the integrated system has been developed for assessing the status of technonatural systems containing LNAPL bodies. It is based on the suggested criteria, and includes geometric, technological, geoecological, resource-economic and inertial-oscillatory groups. The scheme of carrying out a complex of

works, including research, assessment, modeling, and liquidation of LNAPL bodies is proposed. This scheme takes into account the LNAPL dual nature: on the one hand, LNAPL body contaminate the environment, on the other hand, produce secondary hydrocarbon resources. The proposed integrated assessment system permits us to determine the current state of LNAPL bodies as a part of technonatural systems, to select and justify technological solutions for their liquidation and remediation of contaminated sites.

Keywords: *technogenous hydrocarbon deposit, light non-aqueous phase liquid (LNAPL) body, liquidation of LNAPL bodies, assessment of LNAPL bodies, environment conservation*

REFERENCES

1. Akhmadova, Kh.Kh., Makhmudova, L.Sh., Musaeva M.A. *Groznskie tekhnogennye zalezhi uglevodorodov: istoriya, dobycha, pererabotka, ekologicheskie problemy* [Technogenous hydrocarbon deposits in Grozny: history, extraction, and ecological problems]. *V mire nauchnykh otkrytii*, 2013, no. 1.1 (37), pp. 258–283. (in Russian)
2. Babenko, V.D., Solodovnikov, Yu.S., Karagodin, G.V. et al. *Opyt sozdaniya i ekspluatatsii sistem inzhenernoi zashchity podzemnykh vod ot zagryazneniya zhidkimi nefteproduktami na promyshlennakh deistvuyushchikh predpriyatiy neftekhimicheskogo kompleksa* [Experience in construction and operation of engineering systems for groundwater protection from liquid oil products at industrial sites of operating petroleum chemistry complex enterprises]. In: *Zahistovkillya vid antropogennogo navantazheniya*. Kharkov-Kremenchug, 1999, issue 1 (3), pp. 95–100. (in Russian)
3. Bogdanovich, A.M. *Opyt lokalizatsii i likvidatsii neftyanogo zagryazneniya na odnom iz predpriyatiy neftekompleksa* [Experience of localization and elimination of oil pollution at one of the oil complex enterprises]. Available at: <https://www.hydrogeoecology.ru/index.php/biblioteka-gidek/zhurnaly/razvedka-i-okhrana-nedr-11-2005-g> (accessed 15.10.2022) (in Russian)
4. Bykov, D., Chertes, K., Petrenko, E., Tupitsyna, O., Pystin, V., Podyachev, A. *Sanatsiya nedr territorii neftepererabatyvayushchikh zavodov* [Sanitation of bowels at oil refinery territory]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2019, no. 23 (3), pp. 9–13. (in Russian)
5. Galinurov, I.R. *Otsenka tekhnogennykh potokov uglevodorodov v poimakh rek v zone vliyaniya neftekhimicheskikh predpriyatiy (na primere Respubliki Bashkortostan)* [Assessment of anthropogenic hydrocarbon flows in the river floodplains in the zone affected by petrochemical enterprises (by the example of the Republic of Bashkortostan)]. Extended Abstract of Cand. (Engineering) Sci. dissertation. Ufa, UGNTU Publ., 2012, 24 p. (in Russian)
6. *Karta neftebaz OOO "Gazpromneft"-Regional'nye prodazhi* [Map of Gazpromneft-Regional Sales LLC oil depots]. Available at: <https://client.gpn-trade.ru/neft-map/> (accessed 15.10.2022). (in Russian)
7. *Katalog ob'ektov ucheta GBZ s dannymi svodnogo gosudarstvennogo reestra uchastkov nedr i litsenzii GKM* [Catalog of GBZ accounting objects with the data of the consolidated state register of subsoil areas and licenses and GCMs]. Rossiiskii Federal'nyi geologicheskii fond [Russian Federal Geological Foundation] Available at: <https://rfgf.ru/bal/a/index.php> (accessed 31.10.2022). (in Russian)
8. Mazlova, E.A., Anurina, Yu.A. *Problemy zagryazneniya podzemnykh vod na OAO "Moskovskii NPZ" i puti ikh resheniya* [Problems in groundwater contamination at Moscow oil refinery and ways to solve them]. *Izvestiya RAEN. Tekhnologii nefii i gaza*, 2011, no. 2, pp. 43–49. (in Russian)
9. Ostrovskii, Yu.V. *Kompleksnaya rekul'tivatsiya territorii Pavel'tsevskoi neftebazy* [Combined reclamation of Pavel'tsevskaya tank farm]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 210–219. (in Russian)
10. *Reestr proektiruemyykh, stroyashchikhsya i vvedennykh v ekspluatatsiyu neftepererabatyvayushchikh zavodov v Rossiiskoi Federatsii* [Register of refineries designed, under construction and commissioned in the Russian Federation] Available at: <https://minenergo.gov.ru/opendata/7705847529-reestrnppz> (accessed 11.10.2022). (in Russian)
11. Chertes, K.L., Shterenberg, A.M., Petrenko, E.N. *Otsenka sostoyaniya i podkhody k vosstanovleniyu geosredy, narushennoi v rezul'tate stroitel'no-khozyaistvennoi deyatel'nosti* [Assessment of the geoenvironment state disturbed by engineering and economic activities]. *Vestnik MGSU*, 2019, no. 14 (9), pp. 1140–1157. (in Russian)
12. Meng, X.S., Wu, M.M., Chen, H.H., Yue, X., Tao, S.Y. Vertical pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in a heterogeneous unsaturated zone under a coking plant. *Huan Jing Ke Xue*, 2020, vol. Jan 8, no. 41 (1), pp. 377–384. (in Chinese)

**СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ НЕСМЕЯНОВ
(К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

DOI: 10.31857/S0869780923010095, EDN: HSOJKY

5 декабря 2022 г. исполнилось 90 лет **Сергею Алексеевичу Несмеянову** — доктору геолого-минералогических наук, главному научному сотруднику лаборатории эндогенной геодинамики и неотектоники Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук.

Еще в период учебы (в школе и университете — 1947–1956 гг.) Сергей Алексеевич работал в геологических экспедициях в качестве рабочего, коллектора и лаборанта. Позднее участвовал в разномасштабных геологических съемках и тематических работах по стратиграфии, геоморфологии, тектонике, сейсмичности, палеогеографии и палеоэкологии. По этим направлениям он проводил исследования в Казахстане, Средней Азии, Сибири, Монголии, Китае, на Кавказе, Урале, Сахалине, Русской равнине и в других регионах.

С.А. Несмеяновым получен ряд научных результатов, касающихся новейшей тектоники, стратиграфии, геоморфологии, палеогеографии, палеогеоэкологии и сейсмичности. Он автор и соавтор более 340 публикаций, в том числе 35 монографий и брошюр.

В новейшей тектонике С.А. Несмеяновым разработано новое научное направление — **инженерная геотектоника**, изучающая тектонические структуры в постоянно расширяющейся геологической среде техногенеза, нацеленная на прогноз тектонической опасности в будущем, которое оценивается сроком службы разных типов инженерных сооружений. Создан комплексный **оротектонический метод**, включающий ряд прикладных и теоретических направлений, в том числе: расчет максимальных разрывных смещений за срок службы инженерных сооружений, классификация шовных зон и др. Впервые выделены: новые разрывные структуры: (циркообразные сбросы и диаклазовые швы); особый вид разрывных тектонических движений (внутриразрывные движения тектонических клиньев, которые могут быть суперинтенсивными и опасными для строительства). Им проведен иерархический анализ тектоно-климатической цикличности, обусловленной космическими факторами, которая определяет иерархию этапности орогенического рельефообразования. С.А. Несмеяновым составлены региональные сводки районирования не-

тектонических структур с кадастрами складчатых, блоковых и разрывных структур в разных орогенических областях. В настоящее время детальное районирование проводится им как опережающие исследования для инженерных изысканий на территории российского Кавказа.

В стратиграфии и генетическом анализе С.А. Несмеяновым разработано новое научное направление — **генетические комплексы континентальных отложений**, которое отражает типизацию континентальной седиментации и позволяет наметить систему путей совершенствования стратиграфических схем и стратиграфических кодексов, а также схем классификации генетических типов континентальных отложений.

Предложен **частно-литологический подход** (метод) для совершенствования традиционных методов расчленения и корреляции разрезов среднеазиатских континентальных олигоцен-неогеновых отложений с учетом климатогенной окраски глинистых пород. На основе данного подхода были скоррелированы разрезы юго-востока Средней Азии и Южного Казахстана, предложена единая межрегиональная стратиграфическая схема для этих регионов, включающая шесть горизонтов, подтвержденных находками млекопитающих, и выделен ряд стратиграфических подразделений. С.А. Несмеяновым обнаружены три крупных местонахождения млекопитающих. Совместно с Е.Л. Дмитриевой составлена сводка местонахождений третичных млекопитающих юго-востока Средней Азии.

При исследованиях на археологических памятниках С.А. Несмеяновым детально описана специфика **микрофациального анализа** и **микростратиграфии** применительно к культуросодержащим отложениям и разработана классификация культуросодержащих отложений на палеолитических стоянках. В соавторстве с коллегами им созданы региональные сводки по геолого-геоморфологической характеристике палеолитических стоянок открытого и пещерного типов Средней Азии и Кавказа.

Выделена **техногенная формация**, очень быстро накапливающаяся и распространяющаяся из точек роста, обусловленных как геолого-геоморфологическими, так и социальными факторами.

В палеогеографии и палеоэкологии С.А. Несмеяновым предложено самостоятельное направление в палеоэкологии — *палеогеоэкология*. В ее рамках разработаны два метода палеогеографических реконструкций для орогенических областей (метод расчета для опорных точек и метод расчета палеоуклонов речных русел), на основе которых составлены средне- и крупномасштабные поэтапные реконструкции палеорельефа для отдельных регионов; а для альпийских орогенов установлено значительное (на порядок величин) неоплейстоценовое ускорение орогенеза.

Применительно к палеоэкологическим реконструкциям для археологии разработаны представления: о специфике задач и содержания региональной и локальной палеоэкологии и о рациональных масштабных и тематических уровнях палеоэкологических реконструкций применительно к палеолиту. Предложена палеоэкологическая классификация палеолитических стоянок в орогенических областях. Составлена региональная сводка по геоморфологическим аспектам палеоэкологических реконструкций для палеолитических стоянок Западного Кавказа.

В сейсморайонировании С.А. Несмеяновым предложена типизация верхнекоровых сейсмогенерирующих структур; рассмотрено строение шовных зон, составляющих основную часть орогенических верхнекоровых зон возникновения очагов землетрясений (зон ВОЗ); показана возможность проявления в каждом типе сейсмогенерирующих структур сильных землетрясений с различными механизмами сейсмических толчков. Им выявлено определяющее влияние гляциоизостазии от последнего материкового оледенения на сейсмичность северо-запада Восточно-Европейской платформы, что позволило разделить платформу на две части с различным набором сейсмогенерирующих структур.

С.А. Несмеянов — участник целого ряда проектов, связанных с инженерной защитой, уточнением исходной сейсмичности и сейсмическим микрорайонированием урбанизированных и промышленно осваиваемых территорий (на Русской равнине, Кавказе, Сахалине, в Молдавии, Сибири, Средней Азии, Монголии), на атомных стан-

циях (Южноуральской, Крымской, Прибалтийской и др.), ГЭС (Курпсайская в Киргизии и др.), магистральных трубопроводах (“Голубой поток”, Каспийский Трубопроводный Консорциум, Тупапсе-Новороссийск, Сахалин-2), горно-обогаительных комбинатах (Эрдэнэт, Баганур, Салхит в Монголии; Красноярский ГХК), ВЭИ им. Ленина в Подмосковье, в крупных городах и городских агломерациях (Большая Анапа, Большие Сочи, Краснодар, Грозный; Корсаков и Долинка на Сахалине), зонах курортного строительства (Олимпийские объекты Сочи, курорты Северного Кавказа), районах хозяйственного освоения (Ферганский и Зеравшанский в Таджикистане, Иссыкульский в Киргизии и др.); с восстановлением районов стихийных бедствий в зоне Спитакского землетрясения в Армении; с освоением месторождений подземных вод (Пангасский массив в Северном Таджикистане; объект Чоер и г. Улан-Батор в Монголии).

С.А. Несмеянов широко известен среди научной общественности, работает в качестве эксперта, официального оппонента диссертационных работ, выступает с докладами на общероссийских и международных научных конференциях, продолжает успешно работать, получая результаты, которые востребованы и, несомненно, будут актуальными в будущем.

Широкий кругозор, эрудированность, увлеченность наукой и принципиальность — все это привлекает к Сергею Алексеевичу творческих людей. Его отличают оптимизм, доброжелательность и внимание к коллегам, способность видеть главное в сложных проблемах науки, постоянная готовность поддержать новые идеи и преданных этим идеям ученых.

Коллектив Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук сердечно поздравляет юбиляра и желает ему успешной плодотворной работы, неутомимости в научном поиске и новых замыслов, доброго здоровья, творческого вдохновения.

*Редколлегия,
Коллектив ИГЭ РАН*