

ISSN 0869-7809

Номер 1

Январь — Февраль 2024

ГЕОЭКОЛОГИЯ

*Инженерная геология
Гидрогеология
Геокриология*



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2024

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

Моделирование интрузии морских вод при водоотборе из прибрежных водоносных горизонтов <i>Дробязко Е. В., Расторгуев А. В.</i>	3
Математическое моделирование формирования избытков ^{234}U в подземных водах <i>Токарев И. В.</i>	13
Моделирование выщелачивания алюмофосфатного стекла в присутствии бентонита <i>Болдырев К. А.</i>	23

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Новая технология оперативной защиты неподвижного объекта от оползневого давления <i>Постоев Г. П., Казеев А. И., Кучуков М. М., Орлова Н. А.</i>	33
Сейсмичность и сейсмический режим территории Свердловской области <i>Осипова А. Ю., Осипов В. Ю., Бызов Д. Д.</i>	42
Районирование северо-восточной части г. Уфа по условиям развития опасных геологических процессов <i>Епифанова Д. Р., Травкин А. И., Криночкина О. К.</i>	52

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Геоэкологическая оценка водных объектов водосборного бассейна Белого моря на основе геоморфометрического анализа рельефа <i>Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л.</i>	60
Гидрохимические особенности реки Тузлов как индикатор последствий хозяйственной деятельности в Восточном Донбассе (Ростовская область) <i>Сазонов А. Д., Закруткин В. Е.</i>	73

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Оценочное инженерно-геологическое районирование для размещения полигонов твердых коммунальных отходов (на примере Владимирской области Российской Федерации) <i>Осипов В. И., Еремина О. Н., Козлякова И. В., Мамаев Ю. А., Кожевникова И. А., Анисимова Н. Г.</i>	83
Шлаки сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание тяжелых металлов, обработка, возможности использования и допустимость захоронения <i>Юганова Т. И., Путилина В. С.</i>	96

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

О рекультивации земель, нарушенных горными работами в Кузбассе, на основе применения прикладных геофизических технологий <i>Соловицкий А. Н., Никулин Н. Ю.</i>	111
--	-----

CONTENTS

No. 1, 2024

MODELS IN ENGINEERING GEOLOGY AND HYDROGEOLOGY

- Modeling seawater intrusion upon water withdrawal from coastal aquifers
Drobnyazko E. V., Rastorguev A. V. 3
- Mathematical modeling of the excessive ^{234}U formation in groundwater
Tokarev I. V. 13
- Modeling the leaching of aluminophosphate glass in the presence of bentonite
Boldyrev K. A. 23
-

NATURAL AND TECHNONATURAL PROCESSES

- New technology of protecting a stationary engineering structure from landslide pressure
Postoev G. P., Kazeev A. I., Kuchukov M. M., Orlova N. A. 33
- Seismicity and seismic regime in Sverdlovsk region
Osipova A. Yu., Osipov V. Yu., Byzov D. D. 42
- Zoning of the northeastern part of Ufa according to the development of hazardous geological processes
Epifanova D. R., Travkin A. I., Krinochkina O. K. 52
-

ENVIRONMENT CONTAMINATION

- Geocological assessment of water bodies in the drainage basin of the White Sea based on geomorphometric analysis of the relief
Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B., Mineev A. L. 60
- Hydrochemical features of the Tuzlov River as an indicator of the consequences of industrial and agricultural activities in eastern Donbass (Rostov-on-Don region, Russia)
Sazonov A. D., Zakrutkin V. E. 73
-

UTILIZATION AND DISPOSAL OF WASTE

- Estimative engineering geological zoning for allocation of municipal solid waste landfills (by the example of Vladimir region, Russia)
Osipov V. I., Eremina O. N., Kozliakova I. V., Mamaev Yu. A., Kozhevnikova I. A., Anisimova N. G. 83
- Bottom ash from municipal solid waste incineration: composition, leaching of heavy metals, treatment, possibilities of application and permissibility of burial
Yuganova T. I., Putilina V. S. 96
-

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

- On the reclamation of land disturbed by mining in Kuzbass using applied geophysical technologies
Solovitskii A. N., Nikulin N. Yu. 111
-
-

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.332.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТРУЗИИ МОРСКИХ ВОД
ПРИ ВОДООТБОРЕ ИЗ ПРИБРЕЖНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

© 2024 г. Е. В. Дробязко¹, *, А. В. Расторгуев¹

¹Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: levic.kate@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Интрузии морских вод в прибрежные водоносные горизонты являются объектом исследования гидрогеологов с давних пор до настоящего времени. Для прогнозов развития интрузий применяется широкий спектр методов: аналитические, численно-аналитические и численные. В статье рассмотрен прибрежный водозабор, из-за интенсивной эксплуатации которого в извлекаемых водах выросли минерализация, общая жесткость и содержание хлоридов. Для доказательства продвижения интрузии морских вод было проведено химическое опробование воды из водозаборных скважин, по результатам которого были получены значения хлор-бромного коэффициента, указывающего на наличие примеси морских вод в пресных подземных. Оценка интрузии морских вод проводилась с помощью численно-аналитического и численного моделирования. При построении трехмерной численной модели особое внимание уделено характеру связи эксплуатируемого водоносного горизонта с морем. На численной модели было получено изменение положения интрузии морских вод в разные периоды эксплуатации водозабора с различной величиной водоотбора, после чего было проведено сравнение результатов расчетов численно-аналитической и численной моделей.

Ключевые слова: водозабор, интрузия, морские воды, минерализация, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0869780924010019, EDN: GOYOSA

ВВЕДЕНИЕ

Интрузии морских вод являются серьезной проблемой для всех водозаборов, расположенных в приморских районах [1, 3]. Продвижение соленых вод к водозаборным скважинам приводит к ухудшению качества подземных вод и к выводу скважин из эксплуатации на долгое время.

Целью данной работы является выявление и оценка интрузии морских вод на примере прибрежного водозабора подземных вод.

Для изучения интрузии морских вод был выбран прибрежный водозабор, на котором на протяжении истории эксплуатации отмечалось ухудшение качества подземных вод. Главным предположением причины роста минерализации, общей жесткости и хлоридов является интрузия морских вод. Для доказательства ее продвижения к водозаборным скважинам было проведено химическое опробование воды с определением хлор-бромного коэффициента. Для расчета интрузии морских вод были использованы численно-аналитическая и численные модели.

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
УСЛОВИЯ

Исследуемый водозабор расположен в приустьевой части долины реки, где развиты три водоносных горизонта (рис. 1).

1. Аллювиальный в песках, суглинках, супесях верхней части разреза аллювиальных отложений (основной водоносный горизонт аллювия) мощностью 20–50 м. От нижележащего серравальско-мессинского горизонта местами отделен толщей плотных глин мощностью, достигающей 7–8 м. На отдельных участках водовмещающие породы описываемого водоносного горизонта непосредственно залегают на известняках серравальско-мессинского водоносного горизонта. Удельные дебиты скважин изменяются от 0.1 до 10 л/с.

2. Серравальско-мессинский водоносный горизонт на данной территории является основным эксплуатационным и широко используется для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Известняки в долине реки обладают очень высокой проницаемостью, дебиты скважин при откачке составляют 6–60 л/с. Подстилается серравальско-мессинский водоносный горизонт толщей серравальских

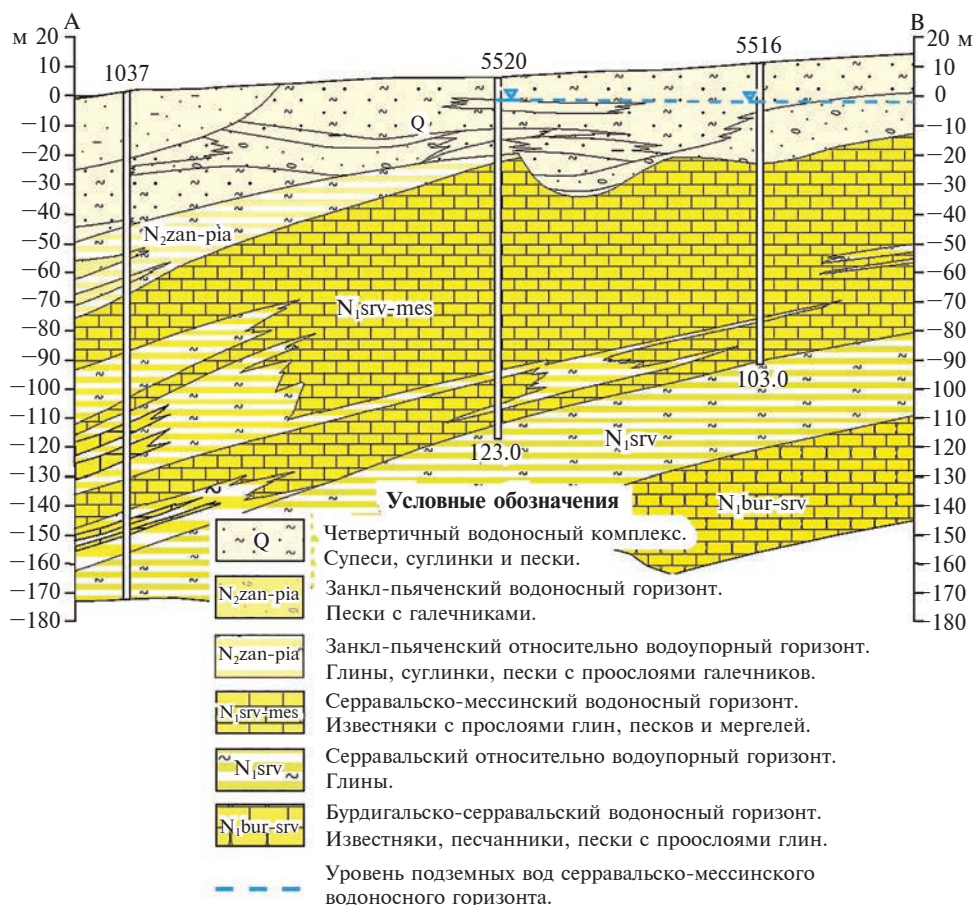


Рис. 1. Гидрогеологический разрез в районе Орловского водозабора.

глин, надежно отделяющих его от залегающего ниже бурдигальско-серравальского водоносного горизонта. Важной особенностью данного района является ограниченная область распространения серравальско-мессинских известняков, к которым приурочен эксплуатируемый водоносный горизонт. Известняки имеют распространение в виде полосы вдоль моря шириной 10–25 км.

3. Бурдигальско-серравальский водоносный горизонт распространен в долине реки повсеместно, залегает третьим от поверхности на глубине 140–214 м. Водовмещающие породы представлены известняками, песчаниками, песками с прослоями глин в нижней части разреза. Горизонт напорный, дебиты скважин составили 1.1–10 л/с при понижениях уровня 17–57 м.

Опыт эксплуатации водозабора

Исследуемый водозабор состоит из 16 эксплуатационных скважин, из них 2 резервные, а 7 скважин законсервированы. Эксплуатационные скважины водозабора оборудованы на серравальско-мессинский водоносный горизонт средне-верхнесарматских отложений. На протяжении работы водозабора дебит откачки изменялся, что приводило

и к изменению гидрохимической обстановки. В работе водозабора выделяется 6 периодов с характерными гидродинамическими и гидрохимическими условиями, из представленных в табл. 1 данных можно судить о связи интенсивности эксплуатации водозабора и повышении минерализации вод.

Подтверждение морской интрузии на основе хлор-бромного коэффициента

Одна из основных характеристик морской воды — отношение содержания хлора к содержанию брома. Для мирового океана оно равно 293 [3]. Для пресных вод это отношение значительно больше 300, поэтому и для окраинных морей, куда поступает большее количество пресных вод, оно имеет также более высокое значение, например, значение хлор-бромного коэффициента для Черного моря составляет 316 [3]. Таким образом, хлор-бромный коэффициент является одним из показателей, позволяющих определить наличие интрузии морских вод в пресные подземные воды.

Для выяснения природы загрязнения подземных вод на исследуемом водозаборе в июле 2021 г. были проведены полевые исследования, в ходе которых были отобраны пробы воды из эксплуатационных

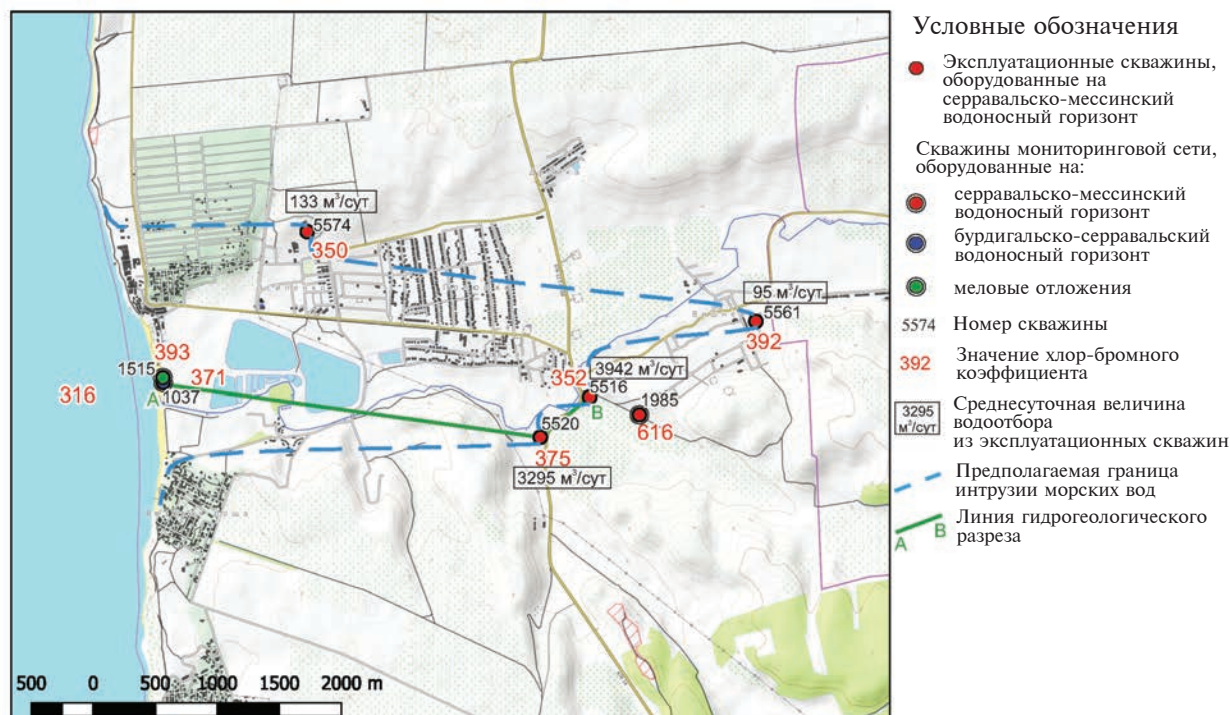


Рис. 2. Распределение значений хлор-бромного коэффициента в районе водозабора.

скважин №№ 5574, 5516, 5520, 5561 (рис. 2). Также для проведения химического анализа были взяты пробы воды из скважин Государственной опорной наблюдательной сети (ГОНС), см. на рис. 2 точки под номерами 1515, 1037 и 1985.

По результатам опробования был рассчитан хлор-бромный коэффициент для каждой из скважин (см. рис. 2). Согласно полученным данным, в эксплуатационных скважинах водозабора отмечаются значения хлор-бромного коэффициента, характерные для вод, содержащих примесь морской воды. В то же время в скважине ГОНС (см. рис. 2, № 1985), оборудованной также на серравальско-мессинский водоносный горизонт, это значение составляет в 1.75 раз больше и соответствует значению, присущему пресным водам. Можно сделать вывод, что данное различие связано с тем, что скв. 1985, расположенная выше исследуемого водозабора по потоку, не является эксплуатационной, следовательно, не подтягивает морские воды.

Также по результатам химического опробования было рассчитано смешение пресных подземных и морских вод в районе исследования. В скважинах водозабора разбавление пресной воды морской по хлоридам составляет порядка 3.5%. При таком соотношении расчетное содержание брома в пресных подземных водах приближено к нулю, что подтверждается лабораторными исследованиями, согласно которым содержание брома в подземных водах, движущихся с берега ниже порога определения (< 0.05 мг/л). Данные расчеты подтверждают морское происхождение брома в скважинах водозабора.

Результаты химических опробований воды из скважин водозабора, а также данные мониторинга, приведенные выше, позволяют сделать вывод о том, что причиной ухудшения качества подземных вод на исследуемом водозаборе является морская интрузия. Также полученные данные позволяют

Таблица 1. Опыт эксплуатации водозабора

Период	Годы	Водоотбор, тыс. м ³ /сут	Минерализация, г/л
1	1970–1984	37.6–53.8	0.6–1.0
2	1984–1990	45.3–19.3	2.0–6.0
3	1990–1997	19.3–32.2	1.4–2.4
4	1998–2001	0.40–0.94	1.5–1.7
5	2001–2009	0.21–0.98	0.7–1.7
6	2009 — настоящее время	16.0–18.7	0.95–1.24

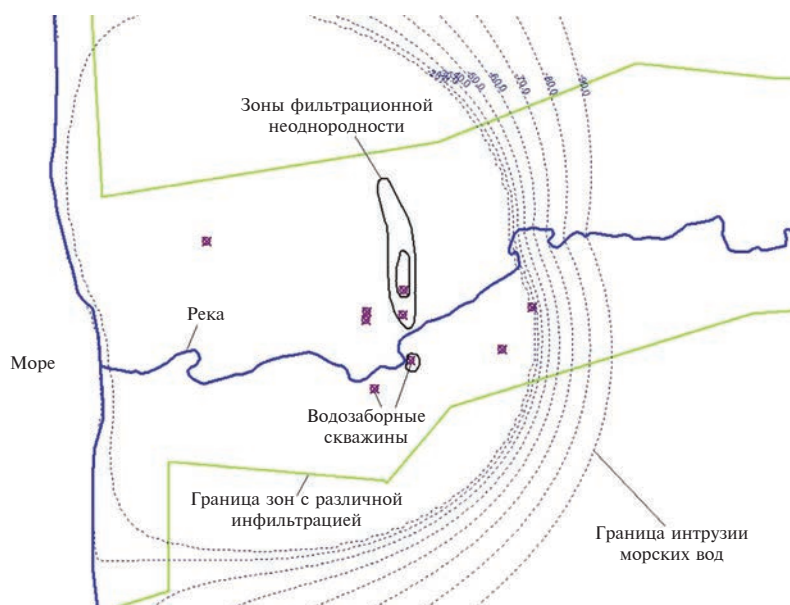


Рис. 3. Положение границы раздела пресных и соленых вод, полученное на основе МАЭ.

провести предполагаемый контур интрузии морских вод в районе водозабора (см. рис. 2).

Расчет интрузии морских вод с помощью численно-аналитического моделирования

Первая оценка развития интрузии была выполнена на плановой модели численно-аналитически, методом аналитических элементов (МАЭ). При этом принималась предпосылка о резкой границе раздела пресных и соленых вод. На модели учтен эксплуатационный водоносный горизонт и неоднородность распределения фильтрационных свойств и инфильтрационного питания. Инфильтрационное питание получено на основе работ коллектива кафедры гидрогеологии. Модель рассчитывалась с современной величиной водозабора, $18.7 \text{ м}^3/\text{сут}$. Фильтрационные свойства серравальско-мессинского водоносного горизонта задавались в соответствии с проведенными ранее опытно-фильтрационными работами. Плотность морских и пресных вод задавалась 1012 кг/м^3 и 1000 кг/м^3 , соответственно. Результаты расчетов МАЭ распространения интрузии с помощью программы GFLOW [8] приведены на рис. 3.

Оценка, полученная на основе МАЭ, показывает наличие интрузии морских вод на исследуемом водозаборе. Однако эти расчеты дают предельную стационарную оценку развития интрузии. Допущениями при расчетах были: однослойное строение, прямая связь с морем и не учёт дисперсии. Для оценок более приближенных к реальности было выполнено численное моделирование.

Уточнение связи водоносного горизонта с морем на основе численных расчетов на профильных моделях

Согласно проводимым ранее исследованиям [5], морские донные отложения в районе изучаемого водозабора представлены песками, благодаря чему связь подземных вод с морем должна быть хорошей. Однако помимо четвертичных отложений между серравальско-мессинским водоносным горизонтом и морем залегают плиоценовые отложения (занкл-пьяченский относительно водоупорный горизонт). Определение состава плиоценовых отложений крайне важно для понимания характера связи морских вод с эксплуатируемым водоносным горизонтом. Согласно данным бурения, плиоценовые отложения представлены глинами с прослоями песков с галькой. Поскольку скважины пробурены только в сухопутной части района, а данных бурения на акватории нет, состав отложений плиоцена под морем остается неизвестным. Были выдвинуты два возможных предположения о составе этих отложений, основанных на имеющихся данных:

1. Плиоценовые отложения под морем представлены глинами. В этом случае морские воды будут проникать в серравальско-мессинский водоносный горизонт путем продвижения по четвертичному водоносному горизонту. После выклинивания плиоценовых глин, в районе исследуемого водозабора соленые воды будут проникать в серравальско-мессинские известняки.

2. Плиоценовые отложения под морем представлены песками с галькой, и морские воды могут проникать в эксплуатационный водоносный горизонт не только путем продвижения по четвертичному

водоносному горизонту, но и путем фильтрации через пески непосредственно под морем.

Для уточнения состава плиоценовых отложений были построены профильные численные модели в программе FEFLOW [6] с разной степенью взаимосвязи моря и подземных горизонтов. Одна из моделей реализует прямую связь моря с подземными водами через пески, у другой связь затруднена глинами.

В обоих вариантах была принята 3-слойная схематизация: четвертичный водоносный комплекс, водоупорные в сухопутной части плиоценовые отложения и серравальско-мессинский водоносный горизонт. Коэффициенты фильтрации на моделях были заданы в соответствии с проведенными ранее опытно-фильтрационными работами в скважинах исследуемого водозабора. *Первый от поверхности слой* соответствует четвертичному водоносному горизонту, представленному переслаиванием песков, супесей и суглинков. Коэффициент фильтрации первого модельного слоя составил 4 м/сут. *Второй слой* — занкл-пьяченский относительно водоупорный горизонт, в сухопутной части представленный глинами. Отложения горизонта под морем в разных вариантах расчета задавались с коэффициентом фильтрации, соответствующим

хорошо проницаемым отложениям (4 м/сут) и глинам (0.0001 м/сут). *Третий модельный слой* соответствует серравальско-мессинскому водоносному горизонту, согласно проведенным опытно-фильтрационным работам, фильтрационные параметры которого на участке расположения скважин водозабора характеризуются более высокими значениями. Распределение коэффициентов фильтрации на профильных моделях представлено на рис. 4. В скважинах водозабора уровень подземных вод находится в пределах от -7.5 м до -7.8, минерализация достигает до 1300 мг/л.

Результаты моделирования за 50 лет показали (рис. 5), что в случае наличия глин в плиоценовых отложениях под морем, существенного развития интрузии, наблюдаемой в виде увеличения минерализации на водозаборе, не отмечается, что не соответствует результатам мониторинга. Наличие песков в плиоценовых отложениях под морем позволяет объяснить наблюдаемое продвижение интрузии.

Расчет интрузии морских вод на трехмерной численной модели

Численные модели позволяют учесть больше факторов, определяющих миграцию (влияние дисперсии, диффузии и плотностной конвекции)

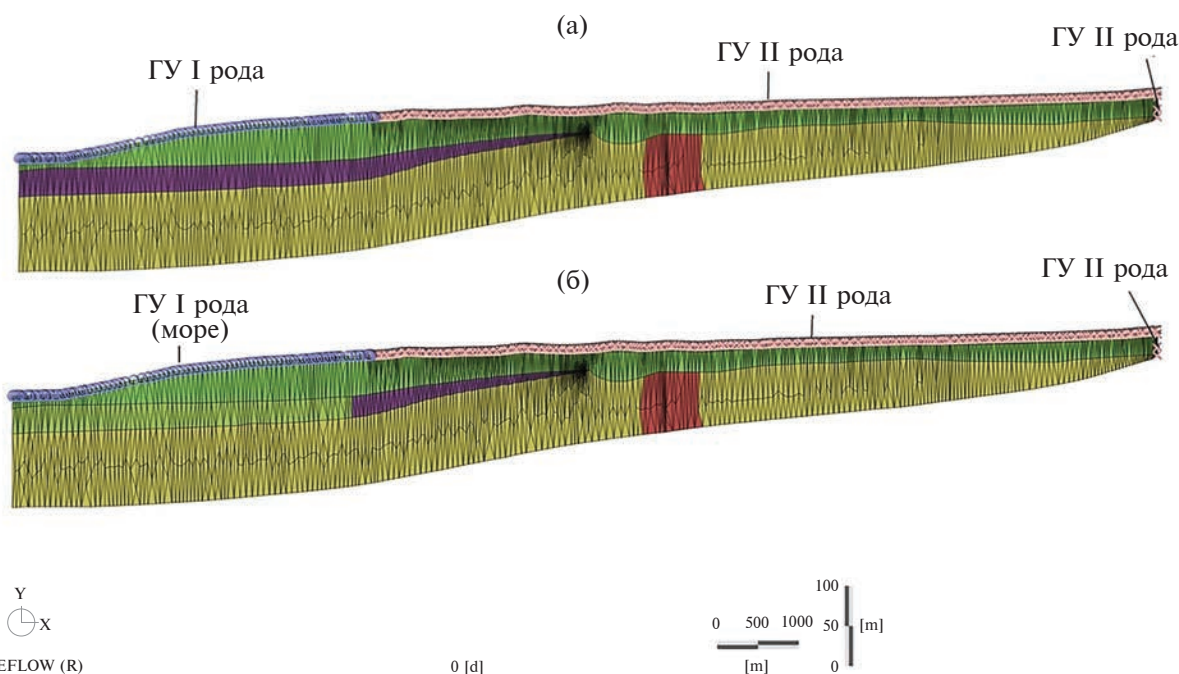
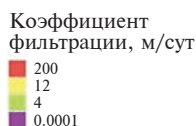


Рис. 4. Фильтрационная схема профильной модели. Плиоценовые отложения под морем представлены: а — глинами; б — песками.

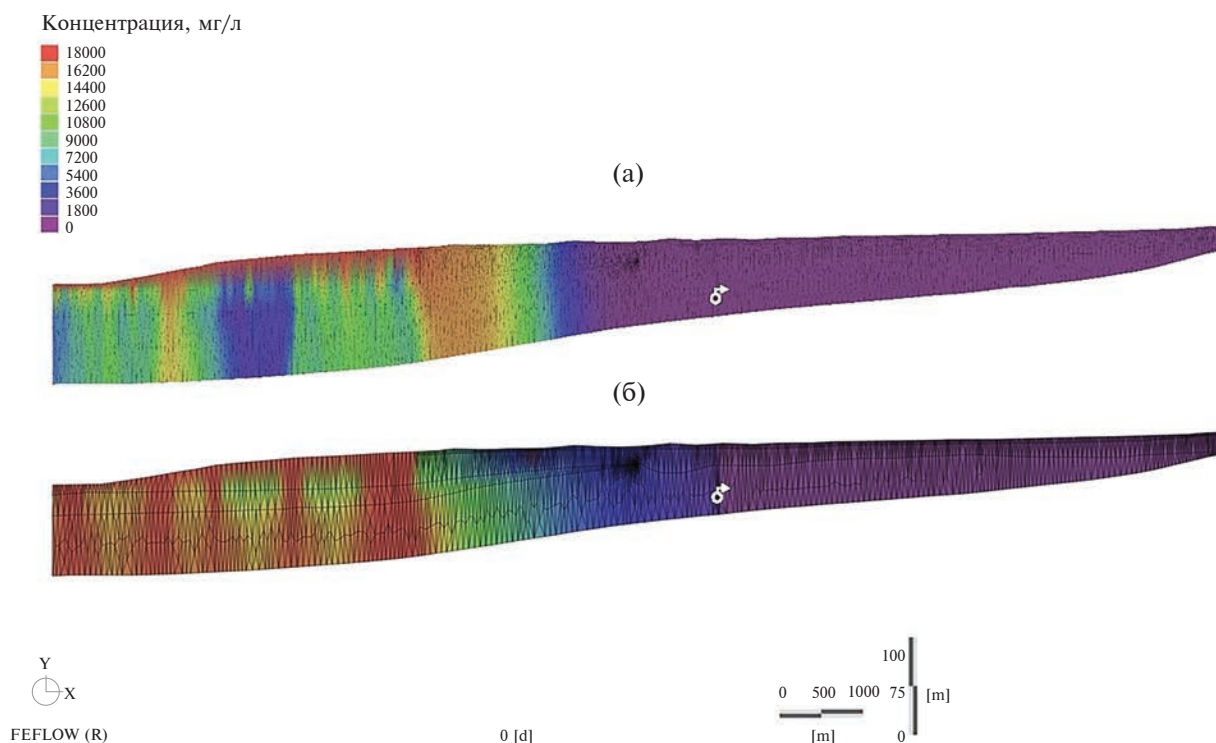


Рис. 5. Результаты расчетов на профильной модели (концентрации). Плиоценовые отложения под морем представлены: а – глинами; б – песками.

[2, 6, 7], в отличие от рассмотренных выше численно-аналитических методов. Следовательно, численное моделирование позволяет точно оценить распространение интрузии морских вод.

Для расчета интрузии морских вод использовался компьютерный код SEAWAT [7], реализующий связанные уравнения фильтрации и миграции методом конечных разностей.

В процессе эксплуатации исследуемого водозабора отмечалось 6 периодов (см. табл. 1), в которых эксплуатация водозабора велась с различной интенсивностью, что было учтено при расчете модели.

При разработке модели расчетная область была разбита на блоки различного размера. Основной шаг дискретизации составляет 500×500 м. По мере приближения к рекам шаг дискретизации уменьшается до 15×15 м. Расчетная область была разделена на 69549 расчетных блоков, плановая дискретизация одинаковая для всех модельных слоев. Общий вид расчетной сетки приведен на рис. 6.

Внешние граничные условия (ГУ) были заданы в соответствии с геофильтрационной схематизацией: северная граница задана ГУ II рода с нулевым расходом. В качестве границы модели на востоке и юге была выбрана граница распространения серравальско-мессинского водоносного горизонта (ГУ II рода с нулевым расходом, в процессе калибровки величина потока будет уточняться). Западная граница — Черное море, которая задается ГУ

I рода в верхнем модельном слое в виде полосы шириной 2.5–4.5 км, где, согласно проводимым ранее исследованиям, принято, что морские донные отложения представлены песками. Связь моря с серравальско-мессинским водоносным горизонтом помимо четвертичных отложений происходит через плиоценовые отложения, что заложено в модель.

Внутренними границами модели являются реки (см. рис. 6), которые на модели задавались ГУ III рода (при значениях проводимости донных отложений равным единице).

С учетом плотности морской воды $\rho_s = 1012$ кг/м³, пресной $\rho_0 = 1000$ кг/м³, приведенный напор воды в граничных ячейках с отметками дна моря z задавался как

$$h = - \frac{(\rho_s - \rho_0)}{\rho_0} z, \quad (1)$$

где ρ_s , ρ_0 — плотность морской и пресной воды, соответственно, кг/м³; z — отметка дна моря, м.

Поскольку исследуемый водозабор оборудован для эксплуатации серравальско-мессинского водоносного горизонта, приуроченного к породам неогенового возраста, на модели были выделены модельные слои, соответствующие следующим горизонтам и комплексам:

— четвертичный водоносный комплекс, представленный переслаиванием супесей, суглинков и песков;

– занкл-пьяченцкий относительно водоупорный горизонт, выполненный преимущественно слабопроницаемыми породами плиоценовых отложений: глинами, суглинками, песками с прослоями гравийно-галечниковых отложений;

– серравальско-мессинский водоносный горизонт, представленный пористыми, трещиноватыми и закарстованными известняками с прослоями глин, песков и мергелей.

Серравальско-мессинский водоносный горизонт подстилается глинами серравальского относительно водоупорного горизонта, кровля которого была принята в качестве водоупора.

Особенностью строения водоносных горизонтов, представленных известняками, является чередование слабопроницаемых и высокопроницаемых зон. На модели это отразилось в разделении серравальско-мессинского водоносного горизонта на 3 модельных слоя:

- верхняя слабопроницаемая часть водоносного горизонта;
- средняя высокопроницаемая зона, полученная по данным резистивиметрии (мощность 4 м);
- нижняя предположительно высокопроницаемая зона (будет уточняться в процессе калибровки).

Таким образом, геофильтрационная модель исследуемого водозабора была разбита на 5 модельных слоев (табл. 2).

На имеющейся расчетной области море было задано в качестве зоны с постоянной минерализацией, в данном случае указана минерализация Черного моря, полученная по результатам химического опробования, проведенного летом 2021 г., — 18.4 г/л, которая была задана на модели в ячейках, расположенных под морем. Величина продольной дисперсивности составила 20 м, поперечной — 2 м.

Для моделирования потока переменной плотности в программе SEAWAT необходимо задать коэффициент $DRHODC = \frac{\partial \rho}{\partial C}$, который представляет отношение разности плотностей соленых и пресных вод к разности их концентраций и позволяет связать плотность и минерализацию:

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial C} C \quad (2)$$

В данной модели коэффициент DRHODC составил 0.691.

В процессе калибровки уточнялось распределение фильтрационных свойств гидрогеологических подразделений, соответствующих модельным

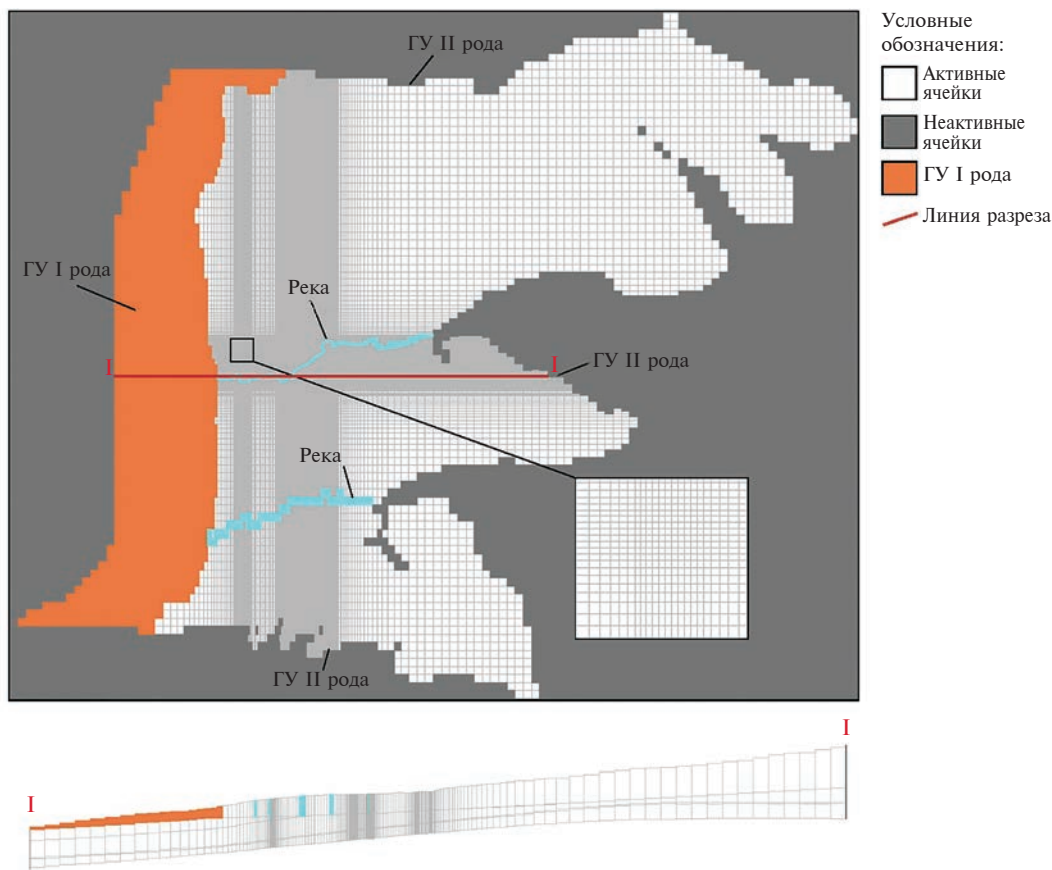


Рис. 6. Плановая дискретизация и граничные условия численной геофильтрационной модели и разрез по линии I—I по расчетной сетке.

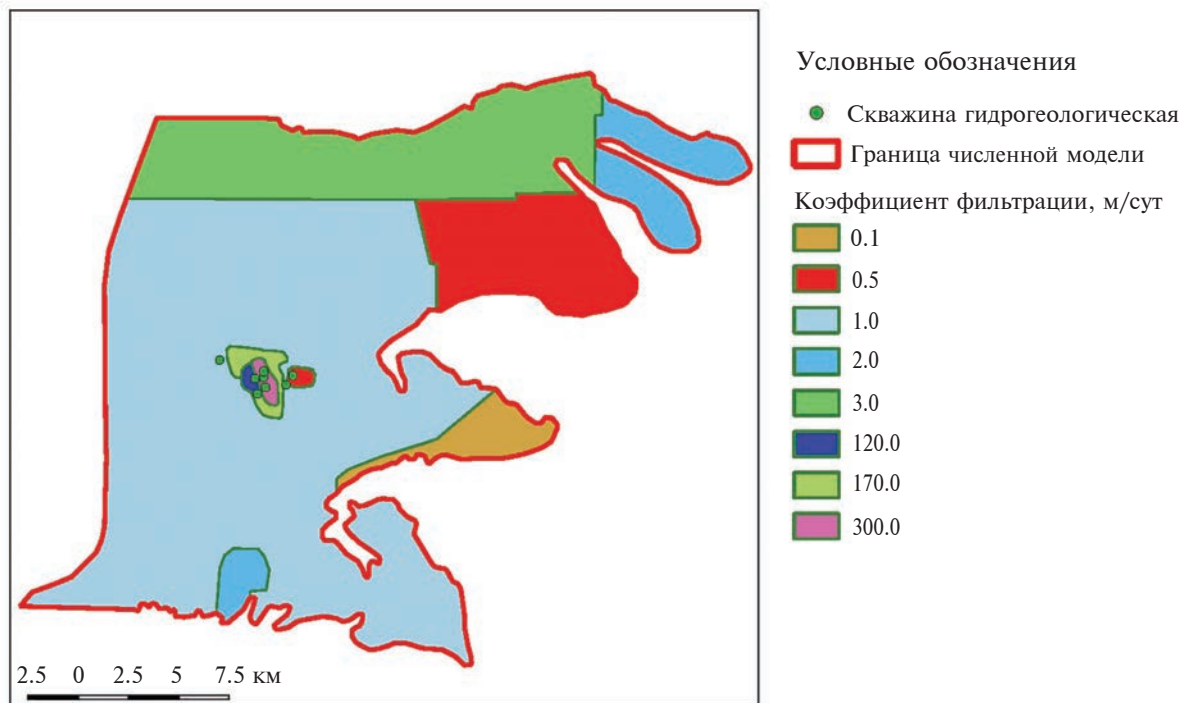


Рис. 7. Распределение коэффициентов фильтрации в четвертом и пятом модельных слоях.

слоям. Также было уточнено, что нижняя часть серравальско-мессинского водоносного горизонта (пятый от поверхности расчетный слой) характеризуется такими же высокими фильтрационными свойствами (рис. 7), как и его средняя часть (четвертый расчетный слой). Помимо фильтрационных свойств было получено, что величина потока подземных вод на восточной и южной границах модели равна нулю.

Полученные решения показывают разную интенсивность развития интрузии морских вод на разных этапах эксплуатации. Наибольшее продвижение интрузии морских вод к скважинам водозабора отмечается на втором и третьем этапах, до того как было принято решение о резком сокращении величины водоотбора с целью уменьшения влияния интрузии и уменьшения минерализации в скважинах (рис. 8).

Модельная интрузия морских вод во 2-м и 3-м периодах эксплуатации достигает скважин водозабора

(см. рис. 8а). Следствием предшествующей интенсивной эксплуатации водозабора в течение 28 лет стало сокращение его производительности в 4-й и 5-й периоды (до 1 тыс. м³/сут), что привело к сокращению интрузии морских вод. И на 6-м периоде эксплуатации водоотбор постепенно увеличивался, поэтому средняя величина водоотбора была задана 16 тыс. м³/сут. Согласно расчетам, отмечается сокращение интрузии морских вод, однако сохраняется риск засоления скв. 5574 (см. рис. 8б).

Результаты моделирования и их обсуждение

Причиной интрузии морских вод в районе исследуемого водозабора стала чрезмерно интенсивная эксплуатация водозабора, что привело к перехвату потока подземных вод и продвижению морских вод к скважинам.

Интрузия морских вод была оценена численно-аналитическим методом с использованием кода GFLOW, показавшая завышенные результаты

Таблица 2. Модельные геофильтрационные параметры

Номер слоя	Название горизонта	Коэффициент фильтрации, м/сут
1	Четвертичный водоносный комплекс (Q)	0.001–3.5
2	Занкл-пьяченцкий относительно водоупорный горизонт (N ₂ zan-pia)	0.0001–3.5
3	Серравальско-мессинский в.г. (N ₁ srv-mes)	0.1–3.0
4	Серравальско-мессинский в.г. (N ₁ srv-mes)	0.1–300
5	Серравальско-мессинский в.г. (N ₁ srv-mes)	0.1–300

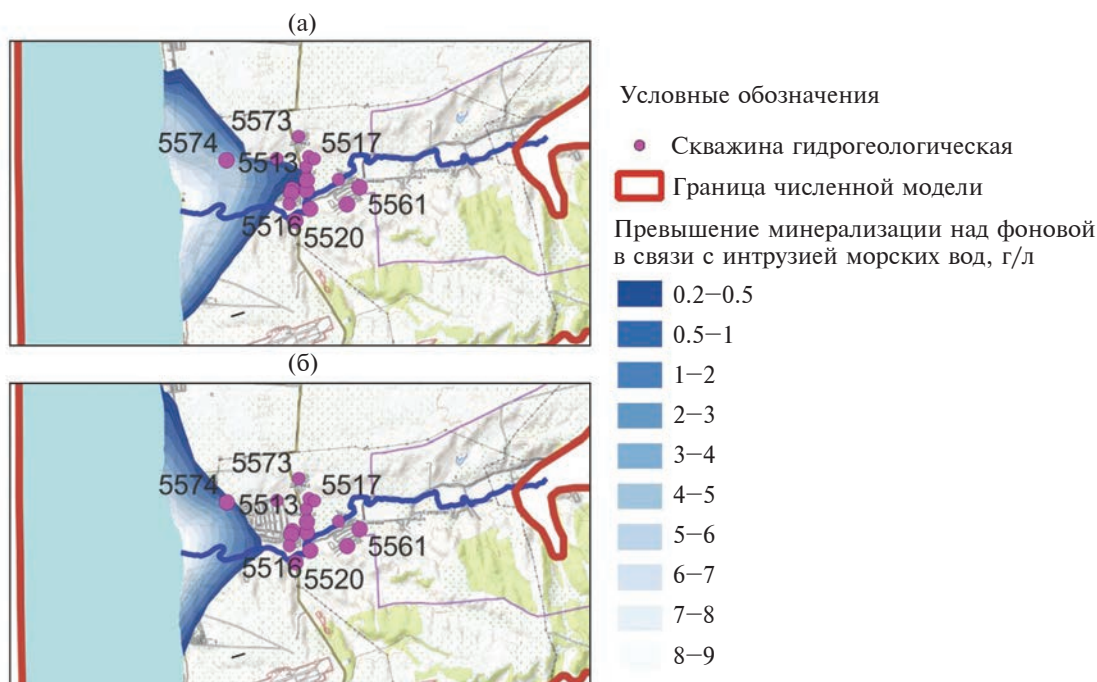


Рис. 8. Плановое распределение превышения минерализации над фоновой в связи с интрузией морских вод на конец третьего (а) и шестого (б) периода эксплуатации водозабора.

продвижения морских вод к водозаборным скважинам. Подобное завышение может быть связано с тем, что в методе используется предпосылка о резкой границе пресных и соленых вод и не учитывается влияние дисперсии. Также расчеты МАЭ дают предельную стационарную оценку развития интрузии.

Для наиболее точного расчета интрузии морских вод было проведено численное трехмерное моделирование, учитывающие влияние дисперсии, диффузии и плотностной конвекции. Также была учтена различная интенсивность эксплуатации водозабора в разные годы, что позволило показать изменение продвижения интрузии морских вод к водозаборным скважинам.

С помощью расчета профильных численных моделей в программе FEFLOW была доказана прямая связь ссравальско-мессинского водоносного горизонта с морем, что увеличило интенсивность интрузии морских вод к скважинам водозабора. Данная связь также была учтена при создании трехмерной численной модели.

Моделирование показало, что наибольшее влияние интрузии морских вод отмечалось во 2-м и 3-м периодах эксплуатации водозабора. Решение о значительном уменьшении величины водоотбора привело к уменьшению интрузии морских вод, однако согласно численному моделированию, скв. 5574 все еще находится в зоне распространения интрузии морских вод.

На данный момент, согласно численной модели, превышение минерализации над фоновой в связи с интрузией морских вод составляет порядка

0.3–0.5 г/л. При фоновом значении минерализации 0.6 г/л минерализация в скважине будет составлять 0.9–1.1 г/л (что подтверждается результатами химического опробования, проведенного в июле 2021 г., — минерализация воды в скважине составила 0.95 г/л, концентрация хлоридов превысила ПДК и составила 396 мг/л). Минерализация в данной скважине значительно зависит от величины водоотбора, поскольку в случаях, когда морские воды уже находятся у водозаборных скважин, увеличение водоотбора приводит к быстрому росту минерализации. Скважины 5521 и 5518 также относятся к скважинам, которые могут оказаться в зоне соленых вод, поскольку интрузия морских вод расположена неподалеку от них, а интенсивный водоотбор приведет к росту минерализации добываемых вод.

Продвижение морских вод к водозаборным скважинам было подтверждено рассчитанными значениями хлор-бромного коэффициента, являющегося маркером для выявления морских интрузий, близкие к значению хлор-бромного коэффициента Черного моря в скв. 5516, 5520, 5561, 5574. Значение хлор-бромного коэффициента воды из скв. 5574 было наиболее близким к показателю для морских вод, что объясняется результатами моделирования.

Работа была выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема 0126-2021-0001, государственная регистрация 121040700170-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Де Уист, Р.Д.* Гидрогеология с основами гидрологии суши. М.: Изд-во Мир, 1965. 312 с.
2. *Капырин И.В.* Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2(19). С. 105–115.
3. *Ксензенко В.И., Стасиневич Д.С.* Химия и технология брома, йода и их соединений. М.: Химия, 1995. 432 с.
4. *Румынин В.Г.* Теория и методы изучения загрязнения подземных вод: учеб. для вузов. СПб.: Наука, 2020. 559 с.
5. *Шнюков Е.Ф., Мельник В.И.* Геология шельфа УССР. Литология. Киев: Наук. Думка, 1985. 190 с.
6. *Diersch, H.-J.G.* FEFLOW Software — Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System — Reference Manual. WASY GmbH, Berlin, 2005. 292 p.
7. *Guo Weixing, Langevin C.D.* User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A7, 2002. 77 p.
8. *Haitjema H.M.* Analytic Element Modeling of Ground-water Flow. Academic Press, Inc. 1995. 395 p.

MODELING SEAWATER INTRUSION UPON WATER WITHDRAWAL FROM COASTAL AQUIFERS

E. V. Drobyazko^{a, #}, A. V. Rastorguev^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia*

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

Seawater intrusions into coastal aquifers have been the object of study by hydrogeologists since long ago. A wide range of methods are used to predict the development of intrusions: analytical, numerical analytical and numerical. The purpose of this paper is to identify and evaluate seawater intrusion using a coastal groundwater intake as an example. The paper considers a coastal groundwater intake, where mineralization, total hardness and chlorides have increased due to intensive exploitation. Seawater intrusion is assumed to be the main reason for the groundwater quality deterioration. To prove the seawater intrusion motion, chemical sampling of water from the intake wells was carried out, which resulted in chlorine-bromine coefficient values indicating the presence of seawater admixture in fresh groundwater. The seawater intrusion was evaluated using numerical-analytical and numerical modelling. The estimation obtained by the analytical element method (GFLOW code) indicates the presence of seawater intrusion at the studied water intake. However, the analytical element method calculations provide the ultimate steady-state estimate of the intrusion development. Also, the method uses the assumption of a sharp freshwater-saltwater boundary. Numerical modelling provides a more realistic assessment. In building the three-dimensional numerical model, special attention was paid to the nature of the connection between the exploited aquifer and the sea. In the onshore part, the Quaternary aquifer is separated from the exploited aquifer by a clay layer with interbedded gravel and sand, but there is no data on the composition of sediments beneath the sea. To clarify their composition, profile numerical models were built in the FEFLOW program with different degrees of connection between the sea and the exploited aquifer. One of the models suggests a direct connection between the sea and groundwater through sand, while the other one is complicated by clay. According to the results of the profile models, the direct connection between the exploited aquifer and the sea was proved, which was taken into account in the construction of the three-dimensional numerical model. On the numerical model in the SEAWAT program, the change in the seawater intrusion position in different periods of water intake operation with different water withdrawal values was obtained, after which the calculation results according to numerical-analytical and numerical models were compared.

Keywords: *water intake, sea water, intrusion, mineralization, numerical and numerical-analytical modelling*

REFERENCES

1. Dewhurst, R.D. [Hydrogeology with the basics of terrestrial hydrology]. Moscow, Mir Publ., 1965. (in Russian)
2. Капырин, И.В. [Calculation codes for hydrogeological modeling in the tasks of NPF safety assessment]. *Radioactive waste*, 2022, no. 2(19), pp. 105–115. (in Russian)
3. Ksenzenko, V.I., Stasinevich, D.S. [Chemistry and technology of bromine, iodine and their compounds]. Moscow, Khimiya Publ., 1960, 432 p. (in Russian)
4. Rumynin, V.G. [Theory and methods of studying groundwater pollution: textbook for universities]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2020, 559 p. (in Russian)
5. Shnyukov, E.F. Mel'nik, V. I. [Geology of the shelf in the Ukrainian SSR. Lithology]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1985. (in Russian)
6. Diersch, H.-J.G. FEFLOW software — finite element subsurface flow and transport simulation system — reference manual. WASY GmbH, Berlin, 2005.
7. Guo Weixing, Langevin, C.D. User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow: U. S. Geological Survey techniques of water-resources investigations, book 6, chapter A7, 2002, 77 p.
8. Haitjema, H.M. Analytic element modeling of ground-water flow. Academic Press, Inc. 1995. 395 p.

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 550.4:551.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗБЫТКОВ ^{234}U В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ© 2024 г. И. В. Токарев¹, *¹Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета, В.О., пер. Декабристов, 16, Санкт-Петербург, 199155 Россия

*E-mail: i.tokarev@spbu.ru

Поступила в редакцию 02.10.2023 г.

После доработки 05.10.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Избытки урана-234 в природных водах коррелируют с глобальными климатическими вариациями, увеличиваясь в теплые и уменьшаясь в холодные эпохи. В подземных водах обнаруживаются ураганные отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \gg 10$ (при равновесной величине равной 1 по активностям). На базе математических моделей показано, что такие аномалии являются результатом длительного в геологическом плане пребывания водоносных горизонтов в мерзлом состоянии в прошлом и их последующего таяния с образованием “возрожденных” вод. Решающий вклад в механизм формирования ураганных избытков ^{234}U вносит присутствие незамерзающей пленочной влаги в составе многолетнемерзлых горных пород.

Ключевые слова: *неравновесный уран, климатические вариации, мерзлота, незамерзающая пленочная влага, модель*

DOI: 10.31857/S0869780924010023, EDN: GOXBFD

ВВЕДЕНИЕ

Голоценовое потепление ведет к деградации евразийского пятна мерзлоты [8]. Уменьшение площади, занятой многолетнемерзлыми горными породами (ММГП), будет продолжаться в будущем, даже при сохранении нынешних климатических параметров неизменными [30]. Количественные характеристики процесса таяния ММГП в региональном плане оценены плохо, хотя они чрезвычайно важны, как для фундаментальных исследований, например, построения климатических моделей, так и для прикладных работ, в частности, для прогноза условий хозяйствования в арктическом и субарктическом регионах.

Равновесное отношение дочернего и родительского изотопов в ряду урана-238 равно $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ (по активностям) и пренебрежимо мало отличается от равновесного для пород, имеющих возраст более 1 млн лет. Однако в среднем для Мирового океана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.14 \pm 0.01$ (за исключением окраинных морей), что является хорошей текущей усредняющей оценкой для гидросферы в целом, так как время жизни урана в морской воде составляет порядка $n \times 10^5$ лет, а основным его источником в океане является сток с континентов [6, 25, 31, 35, 38]. Подземные воды, определяющие поступление урана в речной сток, как правило, обогащены ^{234}U вплоть до $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 3$ [5, 13, 18, 19, 21, 39, 41]. В арктических

и субарктических регионах периодически отмечаются ураганные избытки урана-234 в подземных водах, когда отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$ и достигает в отдельных случаях величин $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 50\text{--}120$ [10, 13, 15, 16, 23, 26, 31, 45].

В работах автора [15, 16, 42, 43] на базе фактических данных показано, что изотопное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в природных водах коррелирует с глобальными климатическими вариациями. При этом избытки урана-234 над равновесным отношением $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ возрастают в теплые и уменьшаются в холодные климатические периоды. Влияние становления и таяния мерзлоты на отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ обсуждалось также в [3, 40]. Отсюда следует, что диагностика наличия мерзлоты в прошлом может быть выполнена на основании изотопного отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. В комплексе датированием и с данными об изотопном составе воды (содержаниях дейтерия и кислорода-18) этот трассер позволяет получить в региональных масштабах количественные оценки темпов деградации ММГП [14].

В настоящей работе на модельном уровне обобщается механизм формирования ураганных избытков урана-234 за счет выщелачивания из вмещающих пород и зависимость величины избытков урана-234 в подземных водах от наличия мерзлоты в прошлом и ее таяния под действием потепления.

2. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПОЯВЛЕНИЯ ИЗБЫТКОВ УРАНА-234 В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Общепринято, что избыточное, по сравнению с равновесным, обогащение подземных вод ураном-234 может быть обусловлено двумя типами процессов.

Первый тип. Радиокинетическое разделение родительского и дочернего изотопов при выщелачивании урана из пород [19, 21, 26], включая:

а) локальное разрушение кристаллической решетки минералов α -частицами и ядрами отдачи при распаде урана-238, а также появление микротрещин и дислокаций в минералах, обусловленное другими физико-химическими процессами;

б) преимущественная мобилизация урана-234, находящегося в степени окисления +6 (водорастворимая форма), в отличие от урана-238, имеющего степень окисления +4 (нерастворимая форма) в кристаллической решетке большинства рудных и акцессорных минералов.

Второй тип. Прямое поступление ядер отдачи ^{234}Th из минеральной матрицы в воду, их осаждением на поверхность минералов вследствие малой растворимости тория и последующим распадом $^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{U}$ [32, 33, 35].

Обогащение подземных вод ураном-234 по описанным выше механизмам в дальнейшем будем называть одностадийной моделью радиокинетического разделения изотопов урана. Концептуальная схема обогащения подземных вод ураном-234 в рамках одностадийной модели приведена на (рис. 1).

Расчеты для модели прямого выхода ядер отдачи ^{234}Th из минеральной матрицы показывают, что появление существенных избытков урана-234 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 5$) возможно только для

мелкодисперсных минеральных индивидов с удельной поверхностью $S > 10^4 \text{ см}^2/\text{см}^3$ [22]. В то время, как в большинстве случаев в природных материалах водоносных горизонтов этот параметр редко превышает величину $S = 500 \text{ см}^2/\text{см}^3$ [37].

Приведенные оценки поддерживаются моделью [24, 29], представленной на рис. 2, из которого видно, что время, необходимое для формирования отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$, составляет не менее нескольких сотен лет. Между тем отмечается накопление урана-234 уже в хвостах переработки урановых руд, относительно исходного материала [11, 12, 21], а также в выщелатах из урановых минералов и ураноносных пород [19].

В естественных условиях механизм формирования избытков урана-234 за счет прямого выброса ядер отдачи за границы зерна, по-видимому, работает в случае высоких содержания й урана в мелкоразмерных акцессориях и интерстициях. При существовании ^{238}U в виде изоморфной примеси в субмиллиметровых и более крупных минеральных зернах избыточные количества урана-234 в поровой воде за счет ядер отдачи накапливаться не могут. Кроме того, наличие водообмена в поровой среде приводит к тому, что текущее отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, рассчитанное по модели [29] и определяемое динамическим равновесием между скоростью потока жидкости и скоростью выхода ядер отдачи, будет сдвигаться в сторону равновесных значений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, то есть может быть реализовано только в мощных региональных водоупорах. Поэтому этот вариант одностадийной модели в данной статье далее рассматриваться не будет.

В. А. Поляков [10] выдвинул идею объяснения сверхвысоких обогащений ^{234}U нахождением пород в мерзлом состоянии в течение геологически значимого периода времени. В период промерзания пород из-за перехода воды в лед происходит

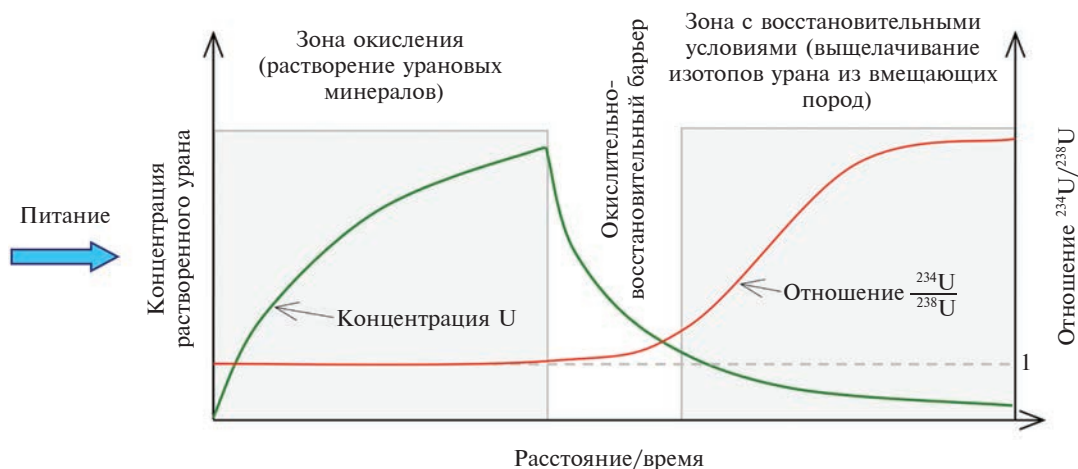


Рис. 1. Концептуальная схема обогащения подземных вод ураном-234 в рамках одностадийной модели радиокинетического разделения [19, 21, 36].

накопление урана-234 в минеральной матрице, как нормального члена радиоактивной цепочки, а затем он быстро теряется при появлении жидкой воды. Возможность влияния замерзания воды на процесс выщелачивания урана-234 за счет появления дополнительных нарушений в кристаллической решетке минералов допускалась также в [20]. Эта модель, включающая этап накопления урана-234 с последующей его быстрой экстракцией из пород, далее будет называться двухстадийной. В данной работе на базе количественных математических моделей автором развивается идея Полякова В. А.

Как будет показано далее, принципиальным для корректного описания условий формирования ураганных избытков урана-234 в подземных водах с формированием отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$ является выдвинутое автором предположение [17] о решающей роли наличия пленочной незамерзающей влаги в ММГП, существование которой в ММГП доказано большим количеством экспериментов [4, 9].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗБЫТКОВ ^{234}U В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Оценка диффузионных параметров

Оценим разницу в диффузионной подвижности ^{238}U (минеральная матрица) и ^{234}U (α -треки) по данным травления α -треков. Форма и длина треков определяется энергией α -частиц, плотностью упаковки кристаллической матрицы, а также близостью трека к ближайшей свободной грани и ориентацией относительно нее, составляя от 2–5 мкм в цирконе до 10–15 мкм в апатите и слюдах [27]. В ходе травления растворение минеральной матрицы и материала треков идет с различной скоростью, из-за чего возникают визуально видимые пустоты. Важным для дальнейшей оценки является то, что “перетравленные” или “недотравленные” треки имеют изометричную форму [27].

Моделирование выполнялось на программном комплексе MtWolf, включающем блоки моделирования фильтрации и массопереноса (автор программы — В. А. Румянцев, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН), а также на пакете Procесing ModFlow, ver. 10). Математическая модель травления трека строилась, исходя из предположения, что разница в скоростях растворения материала α -трека и ненарушенной матрицы определяется только различиями в коэффициентах диффузии. Коэффициент диффузии ^{238}U в кристаллической матрице для акцессорных минералов типа циркона, являющихся “концентраторами” урана в породах вне рудных месторождений урана, составляет $D_{238} \approx n \times 10^{(-18...-20)} \text{ см}^2/\text{год}$ [1]. В минералах с менее плотной упаковкой коэффициент диффузии урана

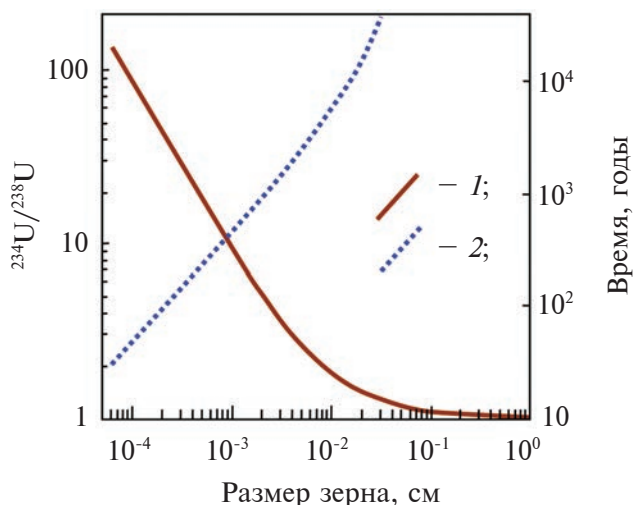


Рис. 2. Изменение отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (кривая 1, шкала слева) и время установления радиоактивного равновесия в поровой воде (кривая 2, шкала справа) в зависимости от размера элементарного зерна при концентрациях урана в матрице $[\text{U}]_{\text{МАТРИЦА}} = 3 \text{ мкг/г}$, $[\text{U}]_{\text{ПОРЕ}} = 3 \text{ нг/г}$ и длине трека отдачи $^{234}\text{Th} / = 55 \text{ нм}$ (адаптировано из [24] и рассчитано по модели [29]).

выше, например, для железо-марганцевых конкреций $D_{238} \sim 5 \times 10^{-8} - 10^{-6} \text{ см}^2/\text{год}$ [28].

На однослойной модели с равномерной разбивкой 150×150 и размером блоков $0.1 \times 0.1 \text{ мкм}$ область разрушения кристаллической решетки (α -трек) задавалась прямоугольником длиной 10 мкм и поперечником 1 мкм. Травление рассчитывалось для коэффициентов диффузии $D_{\text{МАТРИЦА}} = 10^{-10} \text{ см}^2/\text{сут}$ и $D_{\text{ТРЕК}} = 10^{(-6...-9)} \text{ см}^2/\text{сут}$. При $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}} < 100$ выраженные треки не возникают, и все полости имеют изометричные очертания (рис. 3).

Травление моделировалось для различных соотношений коэффициента молекулярной диффузии в материале трека и кристаллической матрице (величины показаны на рис. 3). Начальная длина и поперечник разрушенной α -частицей области — 10 мкм и 1 мкм, соответственно; размер элементарного расчетного блока $0.1 \times 0.1 \text{ мкм}$. При $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}} > 1000$, наоборот, невозможно получить изометрические структуры (невозможно воспроизвести эффект “перетравливания”). Поэтому примем, что, в среднем, $D_{234}/D_{238} \approx 500$. Откуда коэффициент молекулярной диффузии в материале трека $D_{234} \approx 5 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сут}$.

Расчет выноса урана-234 из кристаллической матрицы в динамических условиях

Моделирование выполнялось методом Монте-Карло (автор программы В. Э. Асминг, КНЦ РАН, г. Апатиты). Реализована однослойная модель 1000×1000 расчетных блоков размером $1 \times 1 \times 1 \text{ мкм}$

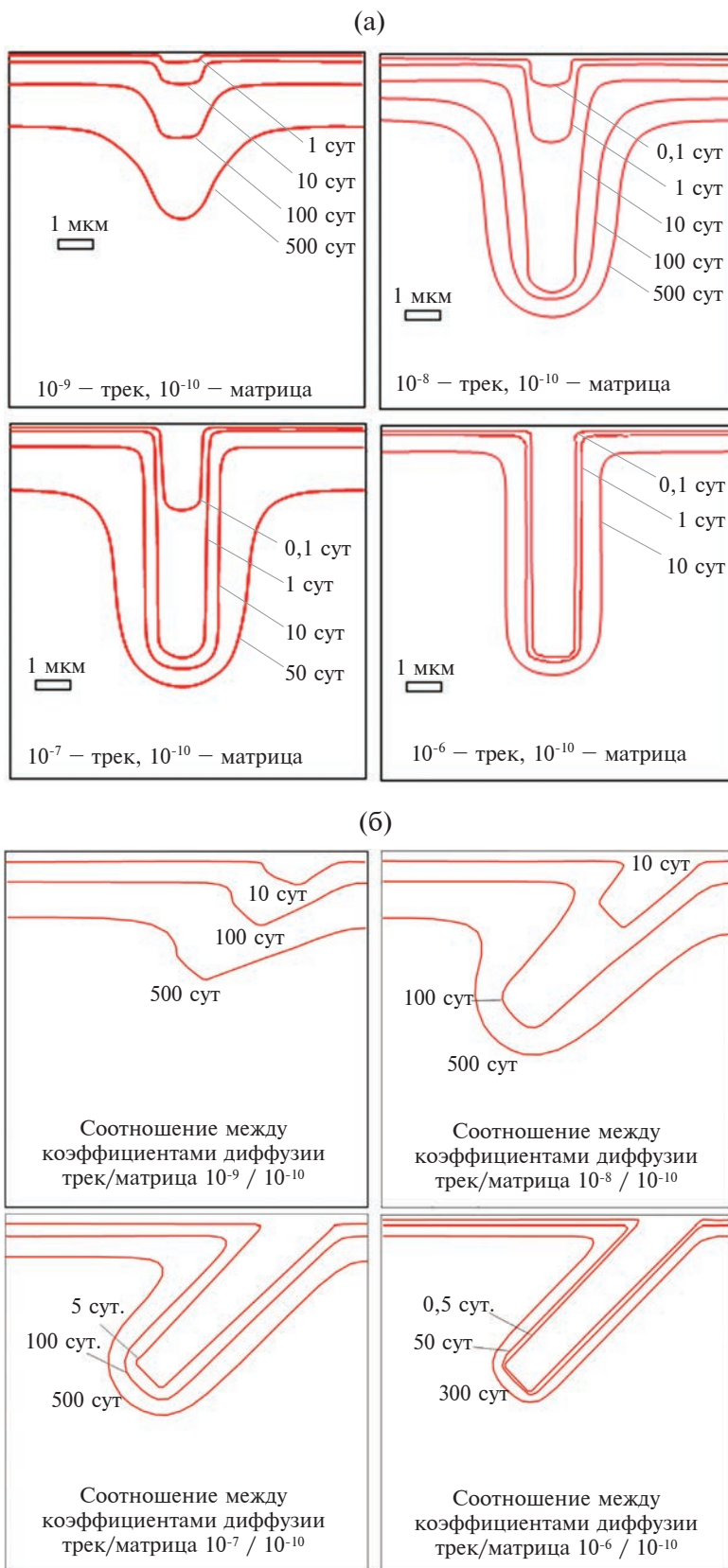


Рис. 3. Формы и размеры полостей, возникающих на месте трека α -частицы при травлении. Трек расположен: а — по нормали к ближайшей грани, б — под 45° к ближайшей грани. Цифры около кривых — продолжительность травления. Расчетная сетка не показана для удобства визуализации.

(рис. 4). Модель минерального зерна включала следующие области:

- 1) индивидуальное кристаллическое зерно, содержащее α -треки;
- 2) микронарушения (межзерновые контакты минеральных индивидов, жидкие включения, микротрещины и т.п.);
- 3) поры с гравитационной водой или льдом.

При наличии жидкой воды поток по порам принимался стационарным, движение вещества в макропорах осуществлялось за счет адвективного переноса, при условии пренебрежения дисперсионным рассеянием. Зерно принималось гидравлически непроницаемым, движение вещества в нем осуществлялось только за счет диффузии при $D_{\text{МАТРИЦА}} \approx n \times 10^{(-18 \dots -20)} \text{ см}^2/\text{год}$ и соотношениях $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}} = 100, 300, 1000, 3000$, а также $D_{\text{МИКРОНАРУШЕНИЕ}}/D_{\text{ТРЕК}} = 10$ и 100 [44].

В треках и кристаллической матрице начальные концентрации изотопов U (количество частиц и их веса) задавались таким образом, чтобы в целом для зерна соблюдалось атомное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 5.5 \times 10^{-5}$ (или $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ по активностям). Начальная концентрация изотопов урана на входе воды в поровое пространство $C_0 = 0$. Количество треков составляло 300, 1000 и 3000 штук

на модель (при средней длине трека 10 мкм, что соответствует плотности $0.0012\text{--}0.012 \text{ мкм}/\text{мкм}^2$). Начальная концентрация U в гравитационной воде и пленочной влаге (микронарушения и поверхность зерна) равнялась нулю. Образование ^{234}U и убыль ^{238}U за расчетный период учитывалось, но новые α -треки не генерировались. Пористость (пустотность) в треках и льду принималась равной $n = 10^{-6}$, в гравитационной воде $n = 1$, в пленочной влаге (микронарушения и поверхность зерна) $n = 0.8$. Соотношение между гравитационной и пленочной влагой по объему $50 : 1$. Модель решалась в стационарной по гидравлическим условиям постановке. Выделением и поглощением тепла и изменением объема жидкости при фазовых переходах жидкость \leftrightarrow лед пренебрегали.

Рассмотрим несколько основных реализованных вариантов модели.

Вариант 1. Одностадийная модель Чердынцева-Чалова с постоянным потоком воды.

Вариант 2. Двухстадийная модель с двумя периодами по гидравлическим условиям и подвариантами по длительности каждого из них:

2.1) отсутствие потока воды — мерзлотные условия и накопление ^{234}U , время — $10^{(3-5)}$ лет;

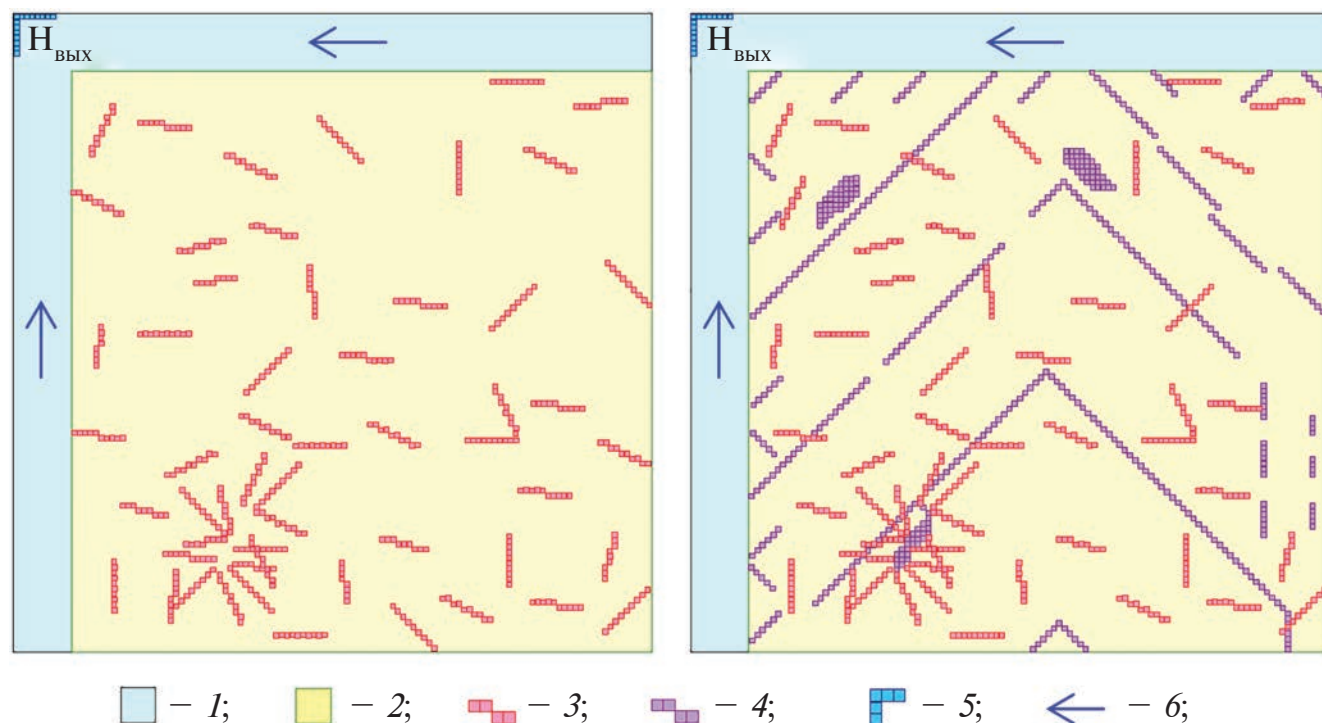


Рис. 4. Фрагмент сеточной модели зерна для расчетов методом Монте-Карло: слева — вариант “матрица + треки”, справа — вариант “матрица + треки + микронарушения”. 1 — поры, содержащие гравитационную воду или лед; 2 — минеральная матрица (гидравлически непроницаема $k = 10^{-10} \text{ м}/\text{сут}$); 3 — треки; 4 — микронарушения (контакты минеральных индивидов, газово-жидкие включения, микротрещины и т.п.); 5 — границы первого рода ($H_{\text{ВХ}} = \text{const}$, $H_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$ и $C_0 = 0$); 6 — направление движения гравитационной воды по порам. Расчетная сетка не показана для удобства визуализации.

2.2) наличие потока воды — таяние мерзлоты и вынос ^{234}U , время — $10^{(0-4)}$ лет.

Использовано два подварианта условий по отношению к пленочной влаге.

Вариант 1. Отсутствие пленочной влаги в микронарушениях и на поверхности зерна для всего времени моделирования.

Вариант 2. Наличие пленочной влаги в микронарушениях для всего времени моделирования, а также на поверхности зерна в период существования ММГП.

3.2.1. Проверка одностадийной модели. Типичные выходные кривые для $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в поровой воде для одностадийной модели Чердынцева-Чалова представлены на рис. 5.

Вплоть до отношений диффузии $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}} = 3000$ в численных экспериментах по схеме, соответствующей одностадийной модели Чердынцева-Чалова, отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} < 10$ для поровой воды на выходе из модели. Наличие микронарушений увеличивает пиковые значения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ на 15–30% по сравнению с вариантом их отсутствия. Выше было показано, что наиболее вероятный диапазон отношений коэффициентов диффузии в треках и матрице $10^2 < D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}} < 10^3$. Следовательно, модель одностадийного радиокинетического разделения не объясняет сверхвысокие ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$) обогащения подземных вод ураном-234. Моделирование поведения урана-234 для неурановых минералов, исходящее из вероятностной схемы поведения

атомов в кристаллической решетке, также дает максимально возможные величины отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} < 10$ [7]. Следует отметить, что после прохождения “волны” выноса урана-234 подземные воды на некоторое время им обедняются, и отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ становится меньше единицы.

3.2.2. Проверка двухстадийной модели. Для реализации двухстадийной модели таяние льда моделировалось скачкообразным увеличением проницаемости пор с $k = 10^{-10}$ до $k = 0.01$ м/сут, но для пленочной влаги коэффициент фильтрации сохранялся равным $k = 10^{-8}$ м/сут. Для подварианта с наличием пленочной влаги коэффициенты диффузии были приняты: а) в пленочной влаге $D = 5 \times 10^{-7}$ см²/сут для периода оледенения и больше на порядок после потепления; б) во льду $D = 10^{-9}$ см²/сут; в) в матрице и треках $D = 10^{-10}$ см²/сут и 5×10^{-8} см²/сут, соответственно. Результаты расчета отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в поровой влаге на выходе из модели для периода после “таяния” льда приведены на рис. 6.

Двухстадийная модель в отсутствие пленочной влаги дает расчетный рост отношения в подземных водах на выходе из модели $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$, но только для нереально высоких отношений коэффициентов диффузии в минеральной матрице и треках на уровне $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}} = 3 \times 10^3$. Искомые ураганные избытки урана-234, приводящие к формированию отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \gg 10$ в талых мерзлотных водах, достигаются только при условии наличия этапа диффузии урана-234

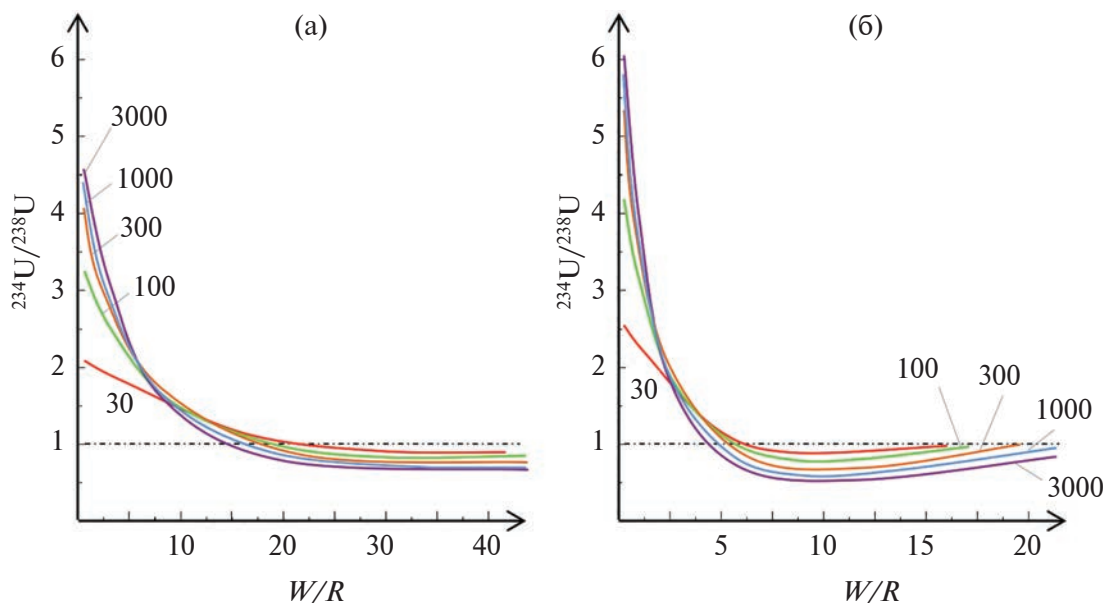


Рис. 5. Одностадийная модель — варианты расчета $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ на выходе из модели при стационарном потоке поровой влаги: а — “матрица + треки”, б — “матрица + треки + микронарушения”; параметр W/R — отношение объема профильтрованной воды к объему зерна; цифры около кривых — отношение $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}}$; черная штрих-пунктирная линия — равновесное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ (геометрия модели на рис. 4, плотность трещин — 0.012 мкм/мкм², матрица зерна гидравлически непроницаема $k = 10^{-10}$ м/сут, пленочная влага отсутствует).

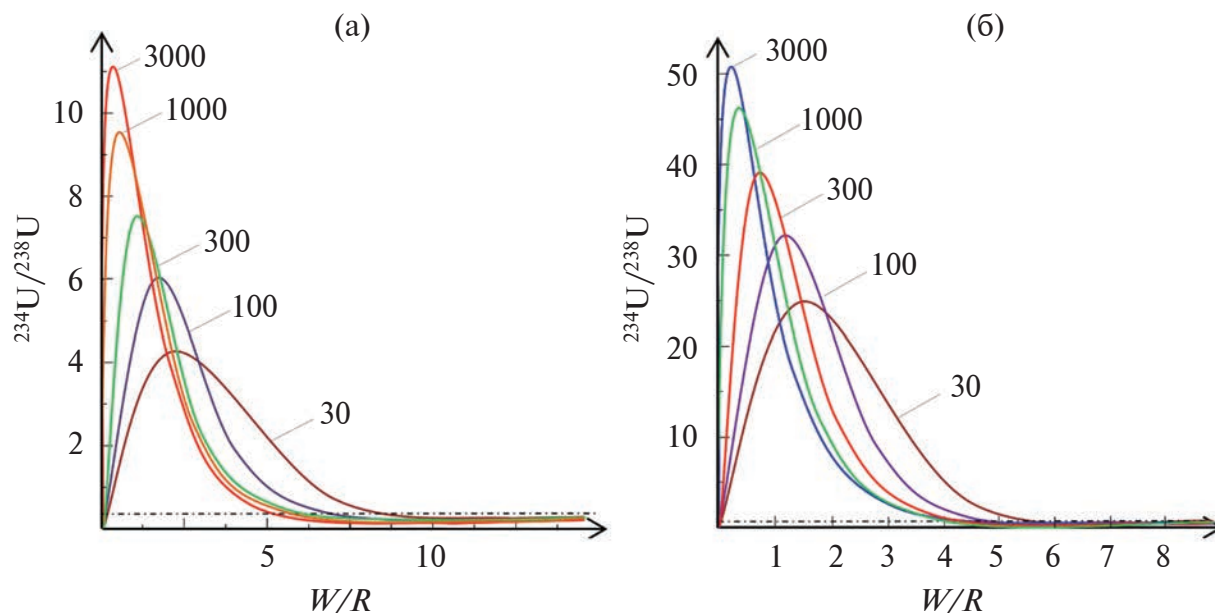


Рис. 6. Вариант расчета $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в поровой воде для двухстадийной модели: а — при отсутствии пленочной влаги, б — при наличии пленочной влаги в ММГП; параметр W/R — отношение объема профильтровавшейся воды к объему зерна; цифры около кривых — отношение $D_{\text{ТРЕК}}/D_{\text{МАТРИЦА}}$; остальные обозначения на рис. 5.

в незамерзающую пленочную влагу в период существования мерзлоты.

Отметим, что извлечение ^{234}U из пород, как правило, должно мало влиять на его содержания во вмещающих породах в целом, поскольку а) его потери со временем восполняются образованием из ^{238}U ; б) для одного и того же объема водоносного горизонта в скелете породы содержится, как правило, минимум в 10^3 раз больше урана, чем в поровой воде. Согласно результатам моделирования, после прохождения фронта свежих инфильтрационных вод, вытесняющих талые мерзлотные воды (“возрожденные” по терминологии В.А. Полякова) из-за уменьшения доступности урана-234 для извлечения из вмещающих пород, должен наступать период, когда отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах должны оказываться ниже равновесных. В ряде реально исследованных обстановок действительно наблюдается обеднение подземных вод ураном-234, когда отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ снижается вплоть до 0.3–0.4 [2, 5, 34].

ВЫВОДЫ

1. Модель Чердынцева-Чалова, предполагающая одностадийное радиокинетическое разделение изотопов в ряду урана-238 и обогащение подземных вод ураном-234 только вследствие его преимущественного выщелачивания из минеральной матрицы, не может объяснить появления сверхбольших отношений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$.

2. Модель В. А. Полякова, предполагающая двухстадийный механизм обогащения подземных

вод ураном-234, когда имеют место стагнация водообмена в период существования мерзлоты и резкое обогащение талых мерзлотных вод указанным изотопом после восстановления водообмена, в полной мере не поддерживается моделированием. Численное моделирование показало, что отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$ могут быть достигнуты только в случае принятия нереально высоких различий в коэффициентах диффузии родительского и дочернего изотопов в кристаллической матрице и треках, соответственно. 3. Развитие автором двухстадийной модели на базе предположения о миграции ^{234}U в незамерзающую пленочную влагу в период существования ММГП и последующего его быстрого перехода в гравитационную влагу в период таяния подземных льдов объясняет возникновение ураганных избытков урана-234 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \gg 10$. Такое обогащение ураном-234 является временным, и, вслед за прохождением фронта вытеснения талых вод свежими инфильтрационными, избытки ^{234}U исчезают.

Таким образом, обнаружение сверхбольших обогащений в системе урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$ позволяет идентифицировать подземные воды, образовавшиеся в ходе таяния мерзлоты.

Работа выполнена в Ресурсном центре “Рентгенодифракционные методы исследования” Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета в рамках программы ГЗ № АААА-А19-119091190094-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомолов Е. С. Диффузия радиогенного свинца в цирконах: автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. Санкт-Петербург, 1992. 17 с.
2. Бондаренко Г. Н., Гудзенко И. С., Ковалюх Н. Н. Формирование фронта радиоактивных и стабильных изотопов в зоне разгрузки артезианского бассейна // Исследования природных вод изотопными методами. М.: Наука, 1981. С. 157–164.
3. Гольдберг Е. Л., Грачев М. А., Эджингтон Д. Н., Навье Ж. и др. Прямая уран-ториевая датировка двух последних межледниковий в осадках озера Байкал // ДАН. 2001. Т. 380. № 6. С. 805–808.
4. Карпенко Ф. С., Кутергин В. Н., Фролов С. И., Собин Р. В. Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 69–78.
5. Киселев Г. П. Четные изотопы урана в геосфере. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 220 с.
6. Кузнецов Ю. В. Радиохронология океана. М.: Атомиздат, 1976. 279 с.
7. Кучеренко Н. Л. Моделирование областей разупорядочения альфа-отдачи ^{238}U и отношения активностей четных изотопов урана в галените и халькозине // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2005. Т. 5. № 1. С. 89–91.
8. Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем / Под ред. В. М. Котлякова. М.: Наука, 2007. 366 с.
9. Осипов В. И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
10. Поляков В. А. Изучение изменений гидрохимии и ресурсов подземных вод прибрежных водозаборов в Эстонии по изотопным данным // Тез. Всесоюзной конференции по гидрогеологии. Звенигород. 1991. С. 60–62.
11. Старик И. Е. Основы радиохимии. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 460 с.
12. Титаева Н. А. Ядерная геохимия. 2-е изд. М.: МГУ, 2000. 336 с.
13. Тихонов А. И. Неравновесный уран в условиях активного водообмена и его использование в геологии и гидрогеологии. Чебоксары: ПБОЮЛ Л. А. Наумова, 2009. 453 с.
14. Токарев И. В. Использование изотопных данных ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) при изучении процессов деградации мерзлоты в результате долговременных вариаций климата // Записки горного института. Тематический вып. “Тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии в современных экономических условиях России”. 2008. Т. 176/ С. 191–195.
15. Токарев И. В., Зубков А. А., Румынин В. Г., Поздняков С. П. и др. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 1. Палеореконструкция условий формирования подземных вод // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 2. С. 219–227.
16. Токарев И. В., Зубков А. А., Румынин В. Г., Поздняков С. П. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 2. Исследование водообмена в многослойной системе изотопными методами // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 3. С. 363–374.
17. Токарев И. В., Хархордин И. Л., Поляков В. А., Румянцев В. А. и др. Изучение поведения $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ и $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ изотопных систем в посткриогенный период на численных моделях фильтрации // Тезисы международной конференции “Приоритетные направления в изучении криосферы Земли. 25–28 мая 2005 г., Пущино”. 2005. С. 54–55.
18. Чалов П. И. Датирование по неравновесному урану. Фрунзе: Илим, 1968. 110 с.
19. Чалов П. И. Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 204 с.
20. Чалов П. И., Тихонов А. И., Васильев И. А. и др. Использование уран-изотопной информации для моделирования движения воды в мерзлых трещиноватых породах // Водные ресурсы. 1991. № 2. С. 96–108.
21. Чердынцев В. В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1967. 238 с.
22. Andrews J. N., Giles I. S., Kay R. L.F., et al. Radioelements, radiogenic helium and age relationships for groundwaters from the granites at Stripa, Sweden // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1982. V. 46. P. 1533–1543.
23. Arndt M. F., West L. A Study of the factors affecting the gross alpha measurement, and a radiochemical analysis of some groundwater samples from the state of Wisconsin exhibiting an elevated gross alpha activity // Wisconsin groundwater management practice monitoring project, DNR-176. Final report, 2004. 57 p.
24. Calsteren van P., Thomas L. Uranium-series dating applications in natural environmental science // *Earth-Science Reviews*. 2006. V. 75. P. 155–175.
25. Dickin A. P. Isotope geology. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press. 2005. 497 p.
26. Fleischer R. L. Alpha-recoil damage: Relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1988. V. 52. P. 1459–1466.
27. Fleischer R.L., Price P. B., Walker R. M. Nuclear tracks in solids. University of California Press. 1975. 983 p.
28. Henderson G.M., Burton K. W. Using $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ to assess diffusion rates of isotopic tracers in ferromanganese crusts // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 170. P. 169–179.
29. Henderson G.M., Slowey N. C., and Haddad G. A. Fluid flow through carbonate platforms: Constraints from $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and Cl^- in Bahamas pore-waters // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 169. P. 99–111.
30. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2023. 184 p.
31. Ivanovich M., Harmon R. S. Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine and environmental sciences. Oxford University Press, 2nd edition. 1992. 972 p.
32. Kigoshi K. Alpha-recoil ^{234}Th : dissolution into water and the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in nature // *Science*. 1971. V. 173. P. 47–48.
33. Kronfeld J. Uranium deposition and Th-234 alpha-recoil: an explanation for extreme U-234/U-238 fractionation within the Trinity aquifer // *Earth Plane. Sci. Lett.* 1974. V. 21. P. 327–330.
34. Kronfeld J., Godfrey-Smith D. I., Johannessen D., Zentilli M. Uranium series isotopes in the Avon Valley, Nova Scotia // *J. Environmental Radioactivity*. 2004. V. 73. P. 335–352.
35. Ku T.-L. An evaluation of the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ method as a tool for dating pelagic sediments // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. № 14. P. 3457–3474.
36. Lambert S. J., Carter J. A. Uranium-isotope systematics in groundwaters of the Rustler formation, northern Delaware basin, southeastern New Mexico I: Principles and preliminary results // Sandia Report SAND87–0388

- UC-721 / Sandia National Laboratories, Albuquerque. New Mexico and Livermore, California. For the US DOE, Contract DE-AC04-76DP00789. 1987. 88 p.
37. *Madsen F. T.* Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal // *Clays Minerals*. 1998. V. 34. P. 109–129.
 38. *Moore W.S. and Sackett W. M.* Uranium and thorium series in equilibrium in seawater // *J. Geoph. Res.* 1964. V. 69. P. 401–405.
 39. *Osmond K. and Cowart J. B.* The theory and uses of natural uranium isotopic variations of hydrology // *Atomic Energy Rev.* 1976. V. 14. P. 621
 40. *Rosenthal Y., Boyle E. A., Labeyrie L., Oppo D.* Glacial enrichments of authigenic Cd and U in subantarctic sediments: A climatic control on the elements' oceanic budget? // *Paleoceanography*. 1995. V. 10. № 3. P. 395–413.
 41. *Rosholt N.* Radioactive disequilibrium studies as an aid in understanding the natural migration of uranium and its decay products // *United Nations Internat. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, 2d. Geneva. Proc. v. 2. 1958.
 42. *Tokarev I., Yakovlev E.* Non-Equilibrium Uranium as an Indicator of Global Climate Variations — The World Ocean and Large Lakes // *Water*. 2021. V. 13. P. 3514.
 43. *Tokarev I. V., Zubkov A. A., Rumynin V. G., Polyakov V. A. et al.* Origin of high $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio in post-permafrost aquifers // *Uranium in the Environment (Mining Impact and Consequences)*. Merkel B. J. and Hasche-Berger A. eds., Springer, 2005. P. 847–856.
 44. *Tuovinen H.P.* Mobilization of natural uranium series radionuclides at three mining sites in Finland: acad. diss. Faculty of Science of the University of Helsinki, Department of Chemistry. Helsinki. 2015. 56 p.
 45. *Yakovlev E., Tokarev I., Zykov S., et al.* Isotope Signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of Groundwater: An Investigation of the Existence of Paleo-Permafrost in European Russia (Pre-Volga Region) // *Water*. 2021. V. 13. P. 1838.

MATHEMATICAL MODELING OF THE EXCESSIVE ^{234}U FORMATION IN GROUNDWATER

I. V. Tokarev^{a, #}

^aScience Park, St. Petersburg State University,
Dekabristov per., 16, V.O., St. Petersburg, 199155 Russia

[#]E-mail: i.tokarev@spbu.ru

Excess of uranium-234 in natural water (ratio $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 1$ in comparison to the equilibrium value as 1 by activity) correlates with global climate variations, increasing during warm and decreasing during cold periods. The hurricane disequilibrium of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \gg 10$ are found in groundwater. Based on mathematical models, it is shown that such anomalies are the result of a geologically long stay of aquifers in a frozen state in the past and the subsequent melting of ground ice with the formation of “revived” water. Non-freezing film moisture present in permafrost rocks make a decisive contribution to the formation of hurricane ^{234}U excess.

Keywords: *disequilibrium uranium, climatic variations, permafrost, non-freezing film moisture*

REFERENCES

1. Bogomolov, E.S. [Diffusion of radiogenic lead in zircons]. Extended abstract of Cand. (Geol.-Min.) Sci. Dissertation, St. Petersburg, 1992, 17 p. (in Russian)
2. Bondarenko, G.N., Gudzenko, I.S., Kovalyukh, N.N. [Formation of a front of radioactive and stable isotopes in the discharge zone of an artesian basin]. In: [Study of natural waters using isotope methods]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 157–164. (in Russian)
3. Goldberg, E.L., Grachev, M.A., Edzhington, D.N. et al. [Direct uranium-thorium dating of the last two interglacials in sediments of Lake Baikal]. *Doklady Akademii nauk*, 2001, vol. 380, no. 6, pp. 805–808. (in Russian)
4. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., Sobin, R.V. [The influence of changes in the properties of hydrate films under temperature influences on the strength of clayey soils]. *Geokologiya*, 2021, no. 1, pp. 69–78. (in Russian)
5. Kiselev, G.P. [Even isotopes of uranium in the geosphere]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 1999. 220 p. (in Russian)
6. Kuznetsov, Yu.V. [Radiochronology of the ocean]. Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 279 p. (in Russian)
7. Kucherenko, N.L. [Modeling of disordering areas of ^{238}U alpha recoil and the ratio of activities of even uranium isotopes in galena and chalcocine]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta*, 2005, vol. 5, no. 1, pp. 89–91. (in Russian)
8. [Glaciation of Northern Eurasia in the recent past and near future]. V.M. Kotlyakov, Ed., Moscow, Nauka Publ., 2007, 366 p. (in Russian)
9. Osipov, V.I. [Physico-chemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IEG RAS, 2012, 74 p. (in Russian)
10. Polyakov, V.A. [Study of changes in hydrochemistry and groundwater resources of coastal water intakes in Estonia using isotope data]. Abstracts of the All-Union Conference on Hydrogeology. Zvenigorod, 1991, pp. 60–62. (in Russian)
11. Starik, I.E. [Fundamentals of radiochemistry]. Moscow, AN SSSR Publ., 1959, 460 p. (in Russian)
12. Titava, N.A. [Nuclear geochemistry]. Moscow, MGU Publ., 2000, 336 p. (in Russian)
13. Tikhonov, A.I. [Nonequilibrium uranium under conditions of active water exchange and its use in geology and hydrogeology]. Cheboksary, L.A. Naumova Publ., 2009. 453 p. (in Russian)
14. Tokarev, I.V. [The use of isotope data ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in studying the processes of permafrost degradation as a result of long-term climate variations]. Notes of the Mining Institute. Thematic issue on trends and prospects for the

- development of hydrogeology and engineering geology in modern economic conditions of Russia. 2008, vol. 176, pp. 191–195. (in Russian)
15. Tokarev, I.V., Zubkov, A.A., Rumynin, V.G., Pozdnyakov, S.P., et al. [Assessing the long-term safety of radioactive waste disposal. 1. Paleoreconstruction of the conditions for the groundwater formation]. *Vodnye resursy*, 2009, vol. 36, no. 2. pp. 219–227. (in Russian)
 16. Tokarev, I.V., Zubkov, A.A., Rumynin, V.G., Pozdnyakov, S. P. [Assessing the long-term safety of radioactive waste disposal. 2. Study of water exchange in a multilayer system using isotope methods]. *Vodnye resursy*, 2009, vol. 36, no. 3. pp. 363–374. (in Russian)
 17. Tokarev, I.V., Kharkhordin, I.L., Polyakov, V.A., Rummyanov, V.A., Tikhonov, A.I. [Study of the behavior of $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotope systems in the post-cryogenic period using numerical filtration models]. Abstracts of the international conference "Priority directions in the study of the Earth's cryosphere." May 25–28, 2005, Pushchino, 2005, pp. 54–55. (in Russian)
 18. Chalov, P.I. [Dating using nonequilibrium uranium]. Frunze, Ilim Publ., 1968, 110 p. (in Russian)
 19. Chalov, P.I. [Isotope fractionation of natural uranium]. Frunze, Ilim Publ., 1975, 204 p. (in Russian)
 20. Chalov, P.I., Tikhonov, A.I., Vasiliev, I.A., Komissarov, V.V. Svetlichnaya, N.A. [Using uranium isotope information to model water movement in frozen fractured rocks]. *Vodnye resursy*, 1991, no. 2, pp. 96–108. (in Russian)
 21. Cherdyn'tsev, V.V. [Uranium-234]. Moscow, Atomizdat Publ., 1967, 238 p. (in Russian)
 22. Andrews, J.N., Giles, I.S., Kay, R.L.F., Lee, D.J. et al. Radioelements, radiogenic helium and age relationships for groundwaters from the granites at Stripa, Sweden. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, vol. 46, pp.1533–1543.
 23. Arndt, M.F., West, L. A Study of the factors affecting the gross alpha measurement, and a radiochemical analysis of some groundwater samples from the state of Wisconsin exhibiting an elevated gross alpha activity. In: Wisconsin groundwater management practice monitoring project, DNR-176. Final report, 2004, 57 p.
 24. Calsteren, van P., Thomas, L. Uranium-series dating applications in natural environmental science. *Earth-Science Reviews*, 2006, vol. 75, pp. 155–175.
 25. Dickin, A.P. Isotope geology. Cambridge, Cambridge University Press, 2005, 497 p.
 26. Fleischer, R.L. Alpha-recoil damage: Relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, vol. 52, pp. 1459–1466.
 27. Fleischer, R.L., Price, P.B., Walker, R.M. Nuclear tracks in solids. University of California Press. 1975, 983 p.
 28. Henderson, G.M., Burton, K.W. Using $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ to assess diffusion rates of isotopic tracers in ferromanganese crusts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, vol. 170, pp. 169–179.
 29. Henderson, G.M., Slowey, N.C., Haddad, G.A. Fluid flow through carbonate platforms: Constraints from $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and Cl^- in Bahamas pore-waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, vol. 169, pp. 99–111.
 30. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. 184 p.
 31. Ivanovich, M., Harmon, R.S. Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine, and environmental sciences. Oxford University Press, 2nd edition. 1992, 972 p.
 32. Kigoshi, K. Alpha-recoil ^{234}Th : dissolution into water and the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in nature. *Science*, 1971, vol. 173, pp. 47–48.
 33. Kronfeld, J. Uranium deposition and Th-234 alpha-recoil: an explanation for extreme U-234/U-238 fractionation within the Trinity aquifer. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974, vol. 21, pp. 327–330.
 34. Kronfeld, J., Godfrey-Smith, D.I., Johannessen, D., Zentilli, M. Uranium series isotopes in the Avon Valley, Nova Scotia. *J. Environmental Radioactivity*, 2004, vol. 73, pp. 335–352.
 35. Ku, T.-L. An evaluation of the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ method as a tool for dating pelagic sediments. *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. 70, no.14, pp. 3457–3474.
 36. Lambert, S.J. Carter, J.A. Uranium-isotope systematics in groundwaters of the Rustler formation, northern Delaware basin, southeastern New Mexico I: Principles and preliminary results. In: Sandia Report SAND87–0388 UC-721. Sandia National Laboratories, Albuquerque. New Mexico and Livermore, California. For the US DOE, Contract DE-AC04-76DP00789, 1987, 88 p.
 37. Madsen, F.T. Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. *Clays Minerals*, 1998, vol. 34, pp. 109–129.
 38. Moore W.S., Sackett W.M. Uranium and thorium series in equilibrium in seawater. *J. Geoph. Res.*, 1964, vol. 69, pp. 5401–5405.
 39. Osmond, K., Cowart, J. B. The theory and uses of natural uranium isotopic variations of hydrology. *Atomic Energy Rev.*, 1976, vol. 14, 621 p.
 40. Rosenthal, Y., Boyle, E.A., Labeyrie, L., Oppo, D. Glacial enrichments of authigenic Cd and U in subantarctic sediments: A climatic control on the elements' oceanic budget? *Paleoceanography*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 395–413.
 41. Rosholt, N. Radioactive disequilibrium studies as an aid in understanding the natural migration of uranium and its decay products. Proc. United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Proc. v. 2. 1958.
 42. Tokarev, I.V., Zubkov, A.A., Rumynin, V.G., Polyakov, V.A. et al. Origin of high $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio in post-permafrost aquifers. In: Uranium in the environment (Mining impact and consequences). Merkel B.J. and Hasche-Berger A., Eds., Springer, 2005, pp. 847–856.
 43. Tokarev, I., Yakovlev, E. Non-equilibrium uranium as an indicator of global climate variations — The World Ocean and large Lakes. *Water*, 2021, vol. 13, p. 3514.
 44. Tuovinen, H.P. Mobilization of natural uranium series radionuclides at three mining sites in Finland. Academic dissertation. Faculty of Science of the University of Helsinki, Department of Chemistry. Helsinki, 2015, 56 p.
 45. Yakovlev, E., Tokarev, I., Zikov, S., Iglovsky, S., Ivanchenko, N. Isotope signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of groundwater: an investigation of the existence of paleo-permafrost in European Russia (pre-Volga region). *Water*, 2021, vol. 13, p. 1838.

МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 542.61:666

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ АЛЮМОФOSФАТНОГО СТЕКЛА В ПРИСУТСТВИИ БЕНТОНИТА

© 2024 г. К. А. Болдырев¹, *¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
ул. Большая Тульская, 52, Москва, 115191 Россия

*E-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 15.10.2023

Принята к публикации 15.11.2023 г.

В статье представлена модель выщелачивания алюмофосфатного стекла — аналога стекломатрицы РАО, в статическом режиме в присутствии бентонита. Параметризация модели основана на экспериментальных данных. Модель учитывает кинетику выщелачивания стекломатрицы и трансформации минеральных фаз бентонита, также производится учет сорбционных процессов и ингибирование выщелачивания образующимися вторичными минеральными фазами. Модель демонстрирует малую трансформацию глинистых фаз, формирование вторичных фосфатных фаз и гиббсита. Моделирование проводилось в расчетном коде PhreeqC.

Ключевые слова: выщелачивание, стекломатрица РАО, алюмофосфатное стекло, ПГЗРО, барьеры безопасности, бентонит, сорбция, PHREEQC

DOI: 10.31857/S0869780924010031, EDN: GOFEVI

ВВЕДЕНИЕ

Понимание поведения стекломатериалов при контакте с водной фазой представляет интерес для многих областей современной науки и техники, включая археологию (в том числе, обращение с культурным наследием), геологию, строительство, волоконную оптику, полупроводниковую технику, изоляцию отходов и др. Последний аспект стоит особняком, поскольку в случае с радиоактивностью ассоциирован с необходимостью прогнозирования выщелачивания на периодах времени порядка миллиона лет.

В СССР и затем в Российской Федерации (РФ) отверждение жидких высокоактивных РАО в алюмофосфатное стекло на промышленной основе началось в 1987 г. [4]. Накопленный объем порядка 10 тыс. т остеклованных РАО размещен на площадке временного хранилища на территории ФГУП ПО “Маяк”.

В соответствии с международным консенсусом такого рода РАО для обеспечения их долговременной безопасности должны захораниваться в глубоких геологических формациях. В РФ для этих целей определён участок “Енисейский” в Красноярском крае [1]. Концепция окончательной изоляции

подразумевает размещение РАО в форме алюмофосфатного стекла в толстостенных стальных контейнерах. Пространство между стенками контейнеров и вмещающей породой будет заполнено бентонитом. После коррозии стали наступит контакт воды, проникающей сквозь массив бентонита, со стекломатрицей.

Бентонит — природная глинистая порода, которая, благодаря комплексу своих уникальных свойств (значительная набухаемость, высокая гидроизоляционная способность и сорбционные свойства по отношению к ряду радионуклидов) широко используется как материал для создания барьеров безопасности. Прогнозирование эволюции бентонита в условиях пункта глубинного захоронения твердых радиоактивных отходов (ПГЗРО) является важнейшей частью оценки безопасности.

Согласно НП-055-14 и др., прогнозирование эволюции ПГЗРО требует использования математических моделей. Для финальной оценки его безопасности следует создать реалистичную и правдоподобную модель выхода радионуклидов за пределы существующих и новосозданных барьеров безопасности. Общая схема формирования интегральной модели прохождения радионуклида сквозь каскад эволюционирующих барьеров безопасности ПХРО¹/ПГЗРО представлена на рис. 1 [2, 3]. Частью этой концептуальной модели будет модель выщелачивания стекломатрицы

¹ ПХРО — пункт хранения радиоактивных отходов



Рис. 1. Схема формирования интегральной модели прохождения поллютанта сквозь каскад эволюционирующих барьеров безопасности.

в присутствии бентонита, учитывающая их взаимовлияние.

В расчетах миграции радионуклидов из источника при выщелачивании из алюмофосфатного стекла необходимо учесть образование фосфатных фаз радионуклидов. В связи с этим разработка моделей выщелачивания алюмофосфатного стекла в присутствии бентонита, учитывающая химические процессы влияния выщелачивания алюмофосфатных стекол на бентонит, является весьма важной и актуальной, представляет высокий интерес. В статье описана модель выщелачивания алюмофосфатной матрицы (NAP-матрицы) в присутствии бентонита, основанная на экспериментальных исследованиях выщелачивания и эволюции фаз бентонита в высокощелочных условиях при повышенных температурах.

МАТЕРИАЛЫ И РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ

Модель выщелачивания NAP-матрицы

Рассмотрим аспекты моделирования выщелачивания NAP-матрицы. Коррозия стекла — сложный процесс, поскольку стекло изменяется с различной скоростью на разных стадиях и в самых разных условиях окружающей среды. Согласно [9], при контакте силикатных стекол с водой могут происходить три основных процесса:

1. Гидратация (молекулы воды проникают в стекло).
2. Гидролиз (вода вступает в реакцию со связями металл-кислород и образует гидроксильные группы).
3. Ионный обмен (заменяются модифицирующие катионы в решетке).

Все три реакции, приводящие к разрушению структуры стекла, тесно взаимосвязаны. Гидролиз открывает структуру, которая усиливает проникновение как молекул воды, так и протонов. К сожалению, механизмы растворения алюмофосфатных стекол менее исследованы. По этой причине при описании выщелачивания будем пользоваться упрощенными моделями.

Кинетику растворения с течением времени можно описать как функцию состава стекла, температуры, pH и химического состава раствора. При

этом критически важными являются значения константы скорости выщелачивания стекла и состав раствора, с которым контактирует барьерный бентонит. При этом следует учесть влияние протекающих химических процессов и температуры.

К настоящему моменту разработаны модели выщелачивания, учитывающие кинетику выщелачивания, на основе следующей зависимости (для расчета растворимости стекла выбирается контролирующая растворение минеральная фаза, назовем ее ведущей фазой) [7, 16–18]:

$$Rate = S \times e^{-\frac{E_A}{RT}} \times \left(1 - \frac{ПАИ}{ПР}\right), \quad (1)$$

где $Rate$ — скорость растворения, моль/м²/с; S — удельная площадь контакта (м²); E_A — энергия активации (Дж/моль); ПАИ — текущее произведение активности ионов в растворе ведущей фазы растворения стекла; ПР — произведение растворимости ведущей фазы растворения стекла.

Вследствие того, что выщелачивание стекла является инкогруэнтным процессом, при выщелачивании на поверхности стекла в зоне контакта с водой образуется слой вторичных фаз, формирующих коррозионный слой. В статье [8] в уравнение выщелачивания (1) был введен член ингибирования выщелачивания:

$$Rate = S \times f_{инг} \times e^{-\frac{E_A}{RT}} \times \left(1 - \frac{ПАИ}{ПР}\right), \quad (2)$$

где $f_{инг}$ — функция ингибирования, которая описывается следующим образом [8]:

$$f_{инг} = 1 / (1 + k_1 \times \sum EQUI_i (\text{“Продукт коррозии”})^{k_2}) \quad (3)$$

где $k_{1,2}$ — аппроксимирующие коэффициенты; $EQUI_i$ (“Продукт коррозии”) — количество i -го образовавшегося продукта коррозии, моль/л.

Данная модель [8], с одной стороны, позволила добиться удовлетворительных результатов по моделированию выщелачивания такого макрокомпонента матрицы, как Na, однако для фосфора ее результаты не совсем удовлетворительны. Кроме того, эта модель не учитывала кинетику растворения фаз контактирующего со стекломатрицей бентонита,

а прогнозирование содержания фосфат-иона, как говорилось, ранее, крайне важно.

Вследствие этого в настоящей работе уравнение выщелачивания стекломатрицы (2) было модифицировано введением члена влияния рН, $[H^+]^n$ (как в [6]):

$$Rate = S \times f_T \times [H^+]^n \times e^{-\frac{E_A}{RT}} \times \left(1 - \frac{ПАИ}{ПР}\right). \quad (4)$$

$$Rate_j = S_j \times \left(\begin{aligned} & j k_{25}^{кисл.} e^{\left[\frac{-j E_a^{кисл.}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right]} [H^+]^{n_j^{H^+}} + \\ & + j k_{25}^{щелоч.} e^{\left[\frac{-j E_a^{нейтр.}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right]} + \\ & + j k_{25}^{щелоч.} e^{\left[\frac{-j E_a^{щелоч.}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right) \right]} [OH^-]^{n_j^{OH^-}} \end{aligned} \right) \times \left(1 - \frac{ПАИ_j}{ПР_j}\right), \quad (5)$$

где $Rate_j$ (моль·с⁻¹·л⁻¹) — скорость растворения j -й твердой фазы; k_{25}^i — константа скорости при 298.15 К (25°C); нейтр. — соответствует нейтральным условиям, кисл. — кислотным, щелоч. — щелочным условиям; n_i — показатель степени.

На основе анализа международного опыта, при моделировании будем учитывать процессы, которые оказывают важное влияние на состав поровой воды. Основные процессы — переходы смектита и аксессуарных минеральных фаз, газообмен с атмосферой (в случае контакта), процессы сорбции (ионный обмен и процессы комплексообразования на поверхности). Параметризация модели осуществляется согласно следующей последовательности:

1. Задаются исходный состав поровой воды бентонита;
2. В предположении, что эта поровая вода находится в равновесии с исходными минеральными фазами бентонита, рассчитываются параметры растворимости твердых минеральных фаз;
3. Задаются площади минеральных фаз (м²/г), задаются законы кинетики растворения, согласно модели, описанной в [13];
4. Задаются внешние условия, аналогичные условиям моделируемого эксперимента.

Экспериментальные данные по эволюции минерального состава фаз бентонита принимались согласно работе [14], в которой авторы исследовали влияние выщелачивания бетона на бентонит при повышенных температурах. В модели осуществляется учет кинетики растворения: смектита, каолинита, иллита, кварца, альбита, хлорита, калиевого

Модель эволюции минерального состава фаз бентонита

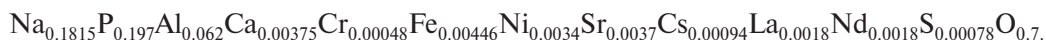
В [13] описаны модели кинетики трансформации фаз монтмориллонита на основе компиляции литературных источников, а также предложена кинетическая модель описания кинетики растворения минеральных фаз, которая нами и будет использована в дальнейшей работе:

полевого шпата (в модели микроклин), кальцита. Также производился учет ионного обмена и комплексообразования на сорбционных центрах, при этом производится учет блокирования ионообменных центров бентонита новосозданными фазами. Расчеты проводились в расчетном коде геохимического моделирования PhreeqC2.18 [15]. Использовалась база термодинамических данных *lnl.dat*.

ОБЪЕДИНЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НАР-СТЕКЛОМАТРИЦЫ И ТРАНСФОРМАЦИИ ФАЗ БЕНТОНИТА

Концепция окончательной изоляции РАО 1 класса в ПГЗРО “Енисейский” подразумевает размещение остеклованных РАО в толстостенных стальных контейнерах. Пространство между стенками контейнеров и вмещающей породой будет заполнено бентонитом. После коррозии стали наступит контакт воды, проникающей сквозь массив бентонита, со стекломатрицей.

Разработанная параметризация модели эволюции фаз бентонита была использована для создания модели выщелачивания. Схема взаимосвязи процессов, происходящих при выщелачивании в контакте с бентонитом, представлена на рис. 2. Укажем, что разные компоненты стекломатрицы будут выходить при выщелачивании в раствор с разной скоростью. Этим реализуется инконгруэнтный характер растворения стекломатрицы. Ведущая растворение стекла фаза — фосфат алюминия. Модель выхода составляющих стекла соответствует модели, принятой в [8]. Было принято, что 1 моль стекла описывается формулой:



В модели принимается, что на расчетном шаге при растворении стекла согласно кинетическому закону его составляющие конгруэнтно переходят в раствор, после чего происходит шаг расчета термодинамического равновесия, согласно которому при превышении предела растворимости происходит осаждение фаз, водная фаза по которым пересыщена.

Значения логарифмов констант растворимости для некоторых твердых минеральных фаз (гиббсита ($\Delta \lg K_s -2$), гидроксиапатита ($\Delta \lg K_s + 7.5$)) в расчетах изменяли, чтобы учесть отличия реальной от идеализированной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала проведено моделирование эволюции фаз бентонита месторождения 10-й Хутор (эксперименты описаны в [14]). При экспериментальном исследовании соотношение Т:Ж составляло 10, температура поддерживалась на уровне 90°C. Результаты расчетов после выполнения параметризации модели с использованием процедуры калибровки приведены в табл. 1. Результаты сравнения модельных и экспериментальных данных

по трансформации фаз бентонита представлены на рис. 3. Видно удовлетворительное соответствие модельных и экспериментальных данных. Следует отметить, что бентонит обладает высокой устойчивостью, рассчитанные значения констант растворимости в уравнении растворения значительно ниже литературных.

Результаты сравнения модельных и экспериментальных данных по выщелачиванию NAR-стекла отображены на рис. 4. Результаты моделирования содержания фаз в системе в ходе выщелачивания отражены на рис. 5.

При рассмотрении рис. 4 заметно, что прогнозируемые кривые выхода макрокомпонентов матрицы Na и P, практически выходят на плато. Концентрация силикат-иона также близка к экспериментальной. Прогнозируемые концентрации магния и кальция превышают в два раза экспериментально измеренные, это может быть объяснено несовершенством существующих термодинамических баз.

Рассмотрим изменения фазового состава (рис. 5). Модель демонстрирует малую трансформацию глинистых фаз, формирование вторичных фаз гиббсита, восьмиводного фосфата магния, гидроксиапатита,

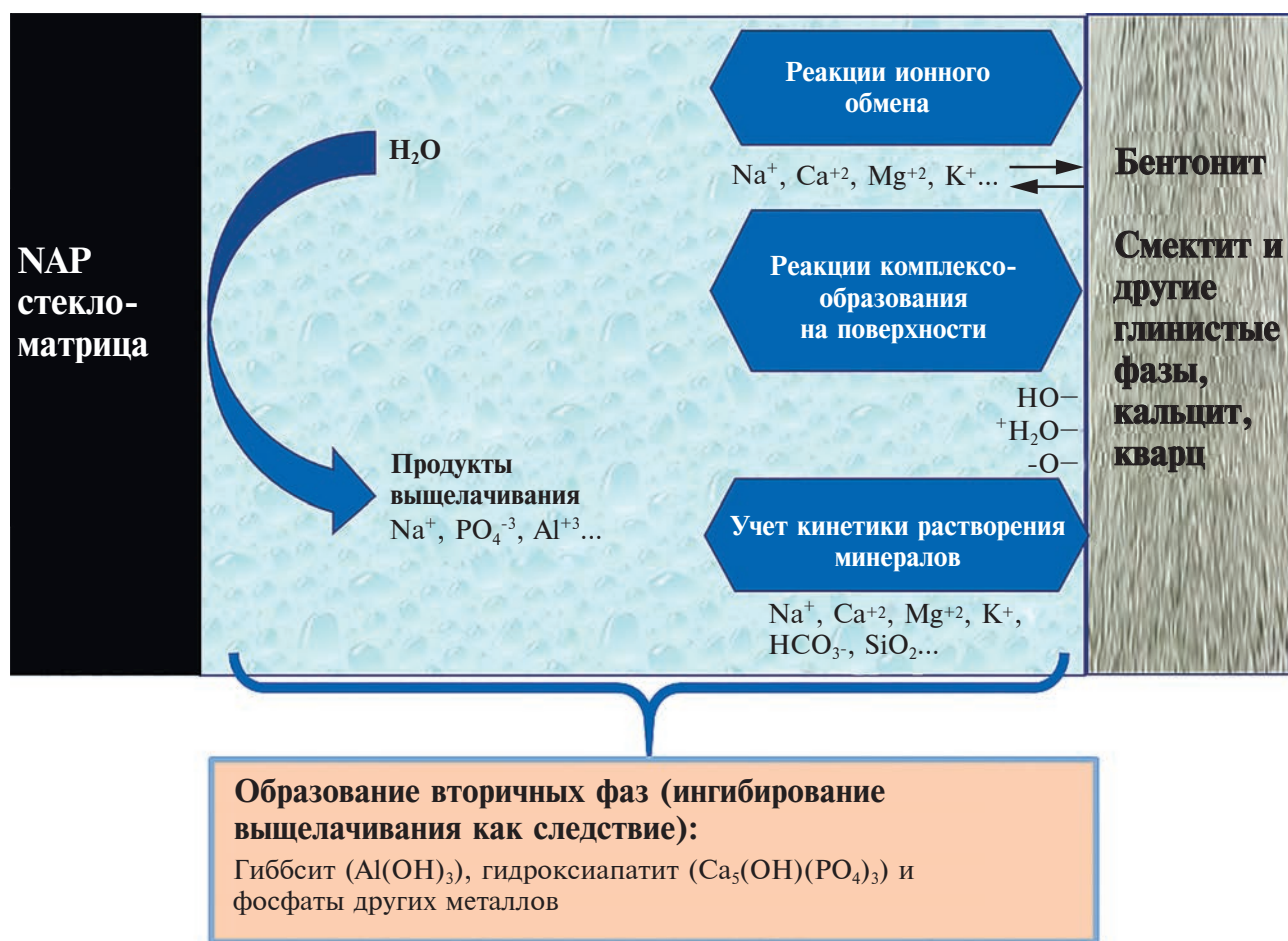


Рис. 2. Учет в модели протекающих процессов.

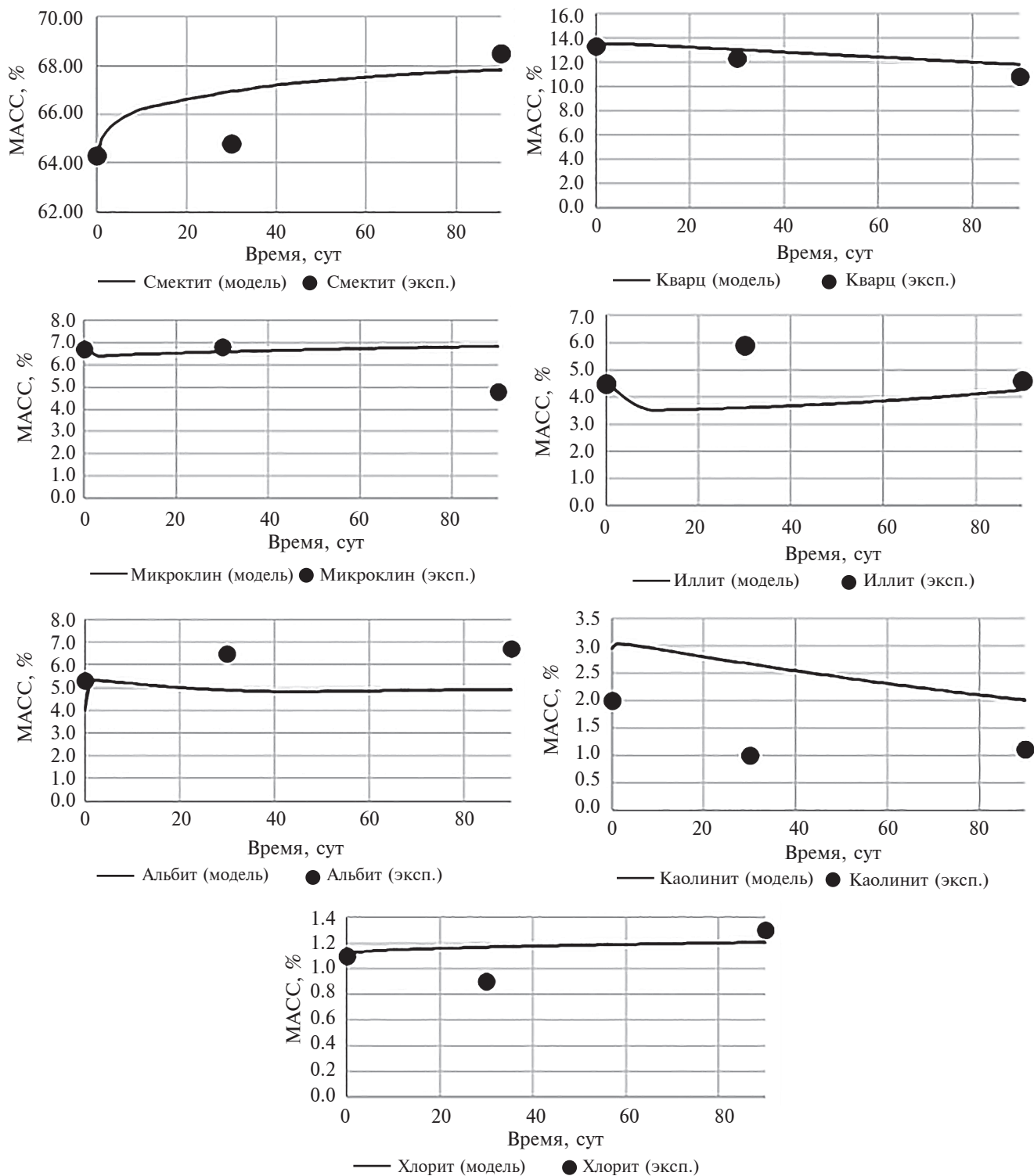


Рис. 3. Результаты сравнения модельных и экспериментальных данных по моделированию трансформации фаз бентонита месторождения 10-й Хутор в щелочных условиях.

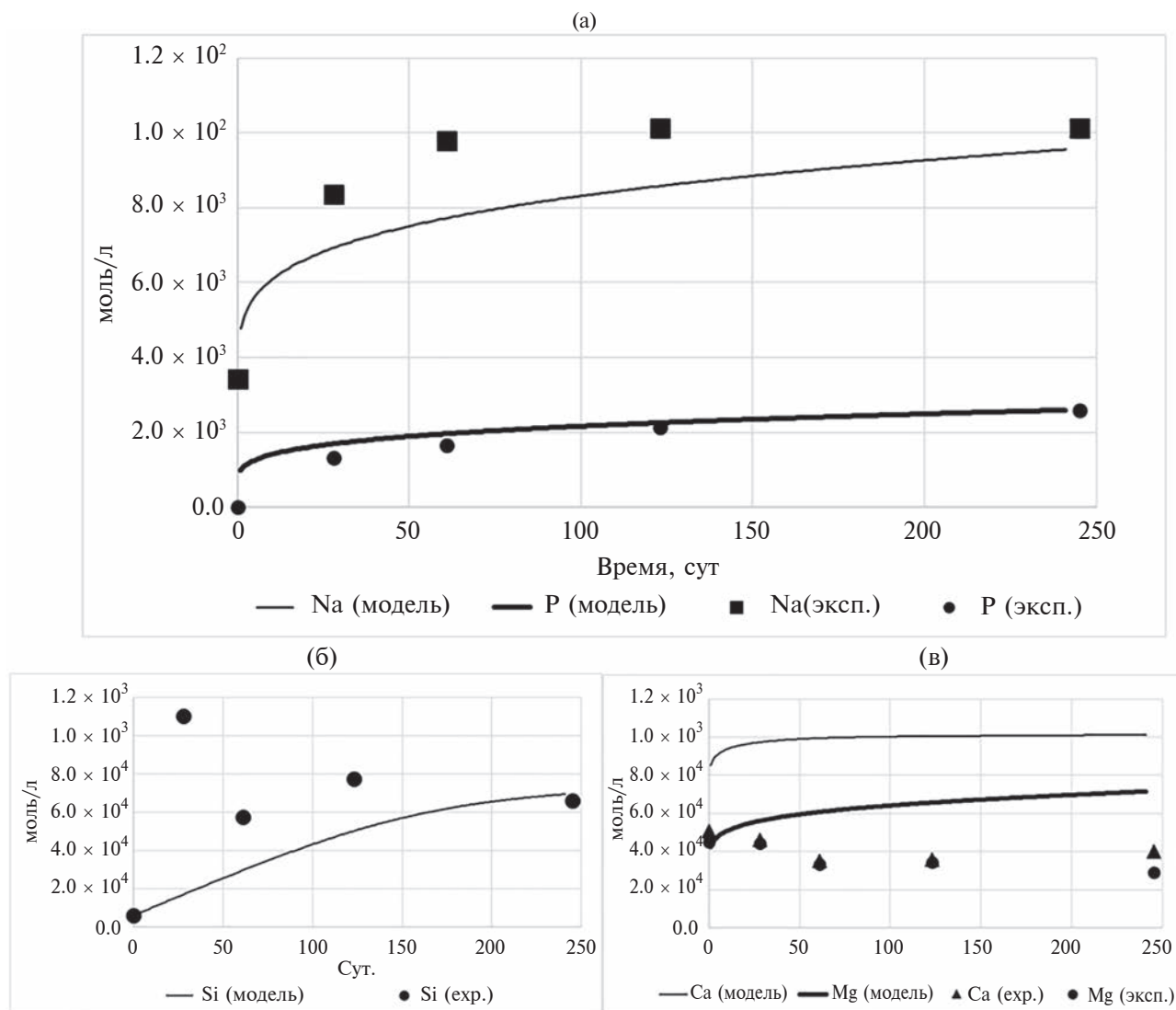


Рис. 4. Результаты сравнения модельных и экспериментальных данных по выщелачиванию NAP-стекла. а – для Na и P; б – для Si; в – для Ca, Mg.

фосфата неодима, лантана, никеля, гидроксида железа. Именно эти фазы и будут формировать коррозионный слой стекла, блокируя его поверхность.

Бентонит и обменный комплекс служат источником кальция и магния, а стекломатрица — фосфат-ионов. Доминирующим, фактически контролирующим влиянием на растворение стекломатрицы обладают следующие процессы — осаждение гиббсита, а также фосфатов кальция и других катионов. Образующиеся вторичные новосозданные фазы будут не только приводить к трансформации свойств контактирующего бентонита, меняя его свойства набухания и водопроводимости, но и захватывать радионуклиды, выщелачивающиеся из матрицы. Этот процесс может приводить к дополнительной фиксации радионуклидов.

В модели площадь открытой поверхности стекломатрицы, контактирующей с раствором, была рассчитана исходя из геометрической

поверхности образца. Известно, что реальный материал матриц в процессе внутреннего облучения накапливает микродефекты, появляются центры кристаллизации внутри стекла, это может приводить к растрескиванию, к увеличению объема (см. [10]). Согласно [11], может наблюдаться увеличение контактной поверхности матрицы вплоть до 40 раз, следовательно, увеличение площади контакта с водой будет способствовать ускоренному выходу компонентов стекломатрицы в раствор и, соответственно, более быстрому выходу раствора на насыщение.

Полученные в статье результаты важны для прогнозирования переноса радионуклидов сквозь барьеры безопасности. На миграцию радионуклидов влияют сорбция и процессы осаждения минеральных фаз. В работе [5] был проведен расчет значений предельной растворимости фаз радионуклидов в условиях выщелачивания алюмофосфатных

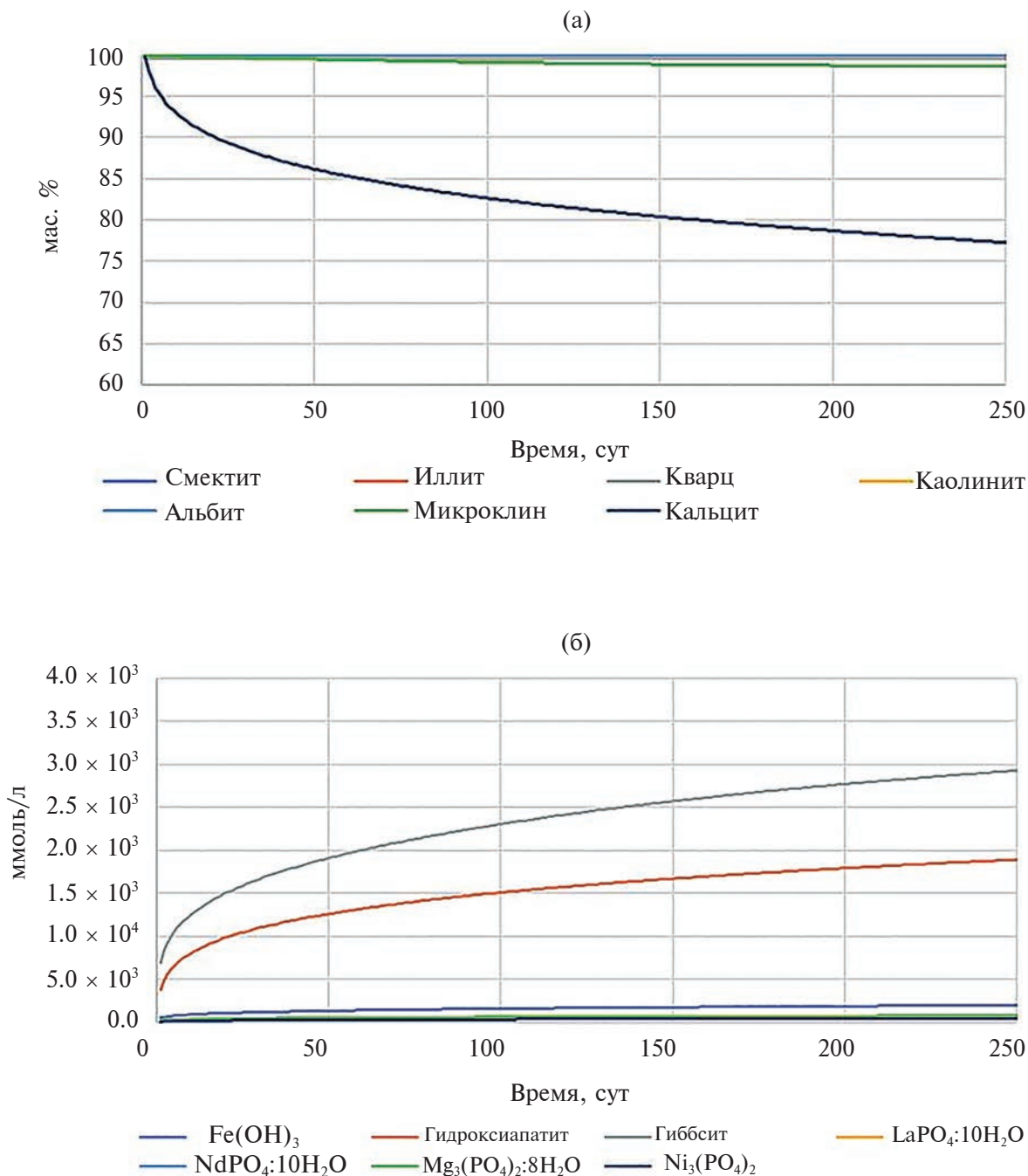


Рис. 5. Результаты моделирования содержания фаз при выщелачивании: а — фаз бентонита в мас. %; б — содержание в системе вторичных фаз.

матриц. Согласно [8], состав выщелатов принимался рН 8.2, концентрации Ca 1×10^{-3} моль/л, фосфат-ион 2×10^{-3} моль/л, а фосфатные фазы в высокой степени вероятности контролируют концентрации Eu, Ho, Ni, Pb, Ra, Th, U. Такие элементы, как Sr, могут образовывать как собственные малорастворимые фосфатные фазы, так и соосаждаться с кальциевыми фосфатными фазами, например, гидроксиапатитом. Согласно исследованию [12], для некоторых радионуклидов чем выше

щелочность среды, тем сильнее фосфат будет влиять на снижение растворимости радионуклида. Полученные в настоящей статье данные демонстрируют важность учета при моделировании миграции радионуклидов сквозь бентонитовый барьер процессов образования твердых минеральных фаз фосфатов и других фаз, следовательно, к переходу к моделям переноса с учетом частично необратимой сорбции.

Таблица 1. Параметризация некоторых членов уравнения в модели эволюции глинистых материалов для бентонита месторождения 10-й Хутор. Кинетические константы (k) выражены в моль $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$, а энергия активации (E_a) — в кДж моль^{-1} (согласно [13] и калибровке*)

Минерал	$S, \text{М}^2/\text{Г}$	$k_{25}^{\text{нейтр.}}$	$jE_a^{\text{нейтр.}}$	$k_{25}^{\text{кисл.}}$	$jE_a^{\text{кисл.}}$	$n_j^{H^+}$	$k_{25}^{\text{щелоч.}}$	$jE_a^{\text{щелоч.}}$	$n_j^{OH^-}$	$K_{\text{осажд.}}$	$jE_a^{\text{нукл.}}$
Альбит	2	5.1×10^{-20} $\times 10^{-21*}$	5.1 -57	8.5×10^{-11} $8.5 \times 10^{-13*}$	-58	0.34	1.4×10^{-10}	-56	0.32	2.15×10^{-13}	-66.4
Иллит	30	3.3×10^{-17}	-35	9.8×10^{-12}	-36	0.52	3.1×10^{-12} $1.6 \times 10^{-12*}$	-48	0.38	2.15×10^{-13}	-66.4
Калиевый полевой шпат	1	1.0×10^{-14}	-31	1.7×10^{-11}	-31	0.27	1.4×10^{-10} $2.8 \times 10^{-11*}$	-31	0.35	2.15×10^{-13}	-66.4
Каолинит	5	1.1×10^{-14}	-38	7.5×10^{-12}	-43	0.51	$1.25 \times 10^{-11*}$	-46	0.58	2.15×10^{-12} $2.15 \times 10^{-13*}$	-66.4
Кварц	0.03	6.4×10^{-14}	-77				1.9×10^{-10} $6.7 \times 10^{-11*}$	-80	0.34		
Смектит	40	9.3×10^{-15} $4.7 \times 10^{-16*}$	-63	5.3×10^{-11} $2.65 \times 10^{-14*}$	-54	0.69	2.9×10^{-12} $3.63 \times 10^{-14*}$	-61	0.34	2.15×10^{-13}	-66.4
Хлорит	1	6.4×10^{-17}	-16	8.2×10^{-9}	-17	0.28	6.9×10^{-9}	-16	0.34	2.39×10^{-9}	-66.4
Кальцит	0.7	1.6×10^{-6} $8 \times 10^{-7*}$	-14.4	5×10^{-1} $5 \times 10^{-3*}$	-14.4	1				1.8×10^{-9} $1.9 \times 10^{-3*}$	-66 -67* $n_j^{CO_2}$ 1.63

Стекломатрица

	$k_{25}^{\text{нейтр.}}$	E_a	$n_j^{H^+}$	k_1	k_2				
НАР-стекло	6.32×10^{-6}	17 [18]	-0.4	3000	3.12				

* — для члена с карбонат-ионом

ВЫВОДЫ

В статье на основе экспериментальных исследований продемонстрирована разработка модели выщелачивания в воде натриевоалюмофосфатного стекла в присутствии бентонита. Модель учитывает кинетику выщелачивания стекломатрицы, а также кинетические параметры растворения индивидуальных фаз бентонита, также производится учет ингибирования выщелачивания вторичными фазами. Результаты работы указывают на формирование фосфатных фаз и гиббсита в зоне контакта с бентонитом. Критическими параметрами, влияющими на процесс выщелачивания, являются задаваемые значения растворимости фосфатных фаз вторичных продуктов, особенно гидроксиапатита.

Полученные результаты станут основой для моделирования миграции выщелачиваемых радионуклидов за пределы барьеров безопасности.

Разработанная методология моделирования эволюции стекломатериалов в водной системе может быть применена к широкому спектру ядерных и неядерных составов стекол, включая силикатные, боросиликатные стекла, а также к стеклокерамике, материалам горячих частиц. Модель подходит для описания эффектов, связанных с химическим составом раствора или составом стекла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А. А., Дорофеев А. Н.* Современное состояние и перспективы развития системы обращения с РАО в Российской Федерации // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 10–21.
2. *Болдырев К. А., Крючков Д. В., Мартынов К. В. и др.* Разработка расчетных методов оценки миграции радионуклидов за пределы ИББ с учетом их эволюции. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2017–11. М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 23 с.
3. *Крючков Д. В., Болдырев К. А.* Принципы комплексного учета процессов эволюции инженерных барьеров безопасности при оценке распространения радионуклидов за пределы объекта // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 106–115.
4. *Ожован М. И., Полуэктов П. П.* Применение стекол при иммобилизации радиоактивных отходов // Природа. 2010. № 3. С. 3–11.
5. *Соболев Д. А.* Расчет значений предельной растворимости твердых минеральных фаз ряда радионуклидов для прогноза выхода радионуклидов из матриц разного состава // Сб. трудов XXI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН. М.: ИБРАЭ, 2022. С. 88–91.
6. *Aagaard P., Helgeson H. C.* Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions. I. Theoretical considerations // American Journal of Science. 1982. V. 282 P. 237–285. <https://doi.org/10.2475/AJS.282.3.237>
7. *Bacon D. H., Ojovan M. I., McGrail P. et al.* Vitrified waste corrosion rates from field experiment and reactive transport modeling // Proc. of ICEM'03: The 9th Int. Conf. on

- Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, September 21–25, 2003, Examination Schools, Oxford, England.
<https://doi.org/10.1115/ICEM2003-4509>
8. Boldyrev, K. A., Martynov, K. V., Kryuchkov, D. V. et al. Numerical Modeling of Leaching of Aluminophosphate Glass in the Batch Mode in the Presence of Bentonite // *Radiochemistry*. 2019. V. 61. № 5. P. 612–618.
<https://doi.org/10.1134/S1066362219050151>.
 9. Bunker, B. C. Molecular mechanisms for corrosion of silica and silicate glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1994. V. 179. P. 300–308.
 10. Donald I. W., Metcalfe B. L., Taylor R. N. J. The immobilization of high level radioactive wastes using ceramics and glasses // *Journal of materials science*. 1997. V. 32. № 22. P. 5851–5887.
 11. Godon N., Gin S., Minet Y., Grambow B. et al. Reference report on the state of the art of glass properties and glass alteration during long term storage and under disposal conditions'. Deliverable 1.1.1 of RTD component 1, Part I. NF-PRO project with the European commission (Contract Number: F16W-CT-2003-02389), 2005, 244 pages.
 12. Long-term performance of permeable reactive barriers. K. E. Roehl, T. Meggyes, F. G. Simon, D. I. Stewart (eds.). Gulf Professional Publishing, 2005. 244 pages.
 13. Marty N. C. M. et al. A database of dissolution and precipitation rates for clay-rocks minerals // *Applied Geochemistry*. 2015. V. 55. P. 108–118.
 14. Morozov I. et al. Bentonite–Concrete Interactions in Engineered Barrier Systems during the Isolation of Radioactive Waste Based on the Results of Short-Term Laboratory Experiments // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. № 6. P. 3074.
 15. Parkhurst D. L. et al. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99–4259. 1999.
<https://doi.org/10.3133/wri994259>
 16. PNNL-13369. Waste Form Release Calculations for the 2001 Immobilized Low-Activity Waste Performance Assessment. 2001.
 17. PNNL-19736. Integrated Disposal Facility FY2010 Glass Testing Summary Report. September 2010.
 18. Poluektov P. P. et al. Modelling aqueous corrosion of nuclear waste phosphate glass // *Journal of Nuclear Materials*. 2017. V. 484. P. 357–366.

MODELING THE LEACHING OF ALUMINOPHOSPHATE GLASS IN THE PRESENCE OF BENTONITE

K. A. Boldyrev^{a, #}

^a*Institute for Safe Development of Nuclear Power Engineering, Russian Academy of Sciences,
ul. B. Tul'skaya., 52, Moscow, 115191 Russia*

[#]*E-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru*

The article presents a model of aluminophosphate glass leaching, an analogue of the RW glass matrix, in static mode in the presence of bentonite. Parameterization of the model is based on experimental data. The model takes into account the kinetics of the glass matrix leaching and the transformation of bentonite mineral phases; sorption processes are also taken into account, as well as the inhibition of leaching by the precipitation of secondary mineral phases formed. The model demonstrates a small transformation of clay phases, as well as the formation of secondary phosphate phases and gibbsite upon leaching of glass in the contact zone with bentonite. The simulation was carried out in the PhreeqC software.

Keywords: *leaching, RW glass matrix, aluminophosphate glass, deep repository of radioactive wastes; safety barriers, bentonites, PhreeqC software*

REFERENCES

1. Abramov, A.A., Dorofeev, A.N. [Current state and prospects of development of the RW managements system in the Russian Federation]. *Radioaktivnye otkhody*, 2017, no. 1, pp. 10–21. (in Russian)
2. Boldyrev, K.A., Kryuchkov, D.V., Martinov, K.V. et al. [Development of calculation methods for estimating the migration of radionuclides beyond the engineering safety barriers, taking into account their evolution]. Preprint IBRAE-2017–11. Moscow, IBRAE RAN, 2017, 23 p. (in Russian)
3. Kryuchkov, D.V., Boldyrev, K.A. [Principles ensuring comprehensive accounting of processes associated with engineered safety barriers' evolution: assessing radionuclide spread beyond site boundaries]. *Radioaktivnye otkhody*, 2019, no. 4 (9), pp. 106–115.
<https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-106-115>
 (in Russian)
4. Ozhovan, M.I., Poluektov, P.P. [Glasses for immobilization of nuclear waste]. *Priroda*, 2010, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
5. Sobolev, D.A. [Calculation of the values of the solubility limits of solid mineral phases of a number of radionuclides for predicting the release of radionuclides from matrices of different compositions]. Proc. the XXI Sci. Workshop of young scientists, IBRAE RAS, 2022, pp. 88–91.
6. Aagaard, P., Helgeson, H.C. Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions. I. Theoretical considerations. *Am. J. Sci.* 1982, no. 282, pp. 237–285.
7. Bacon, D.H., Ojovan, M.I., McGrail, P. et al. Vitrified waste corrosion rates from field experiment and reactive transport modeling. Proc. of ICEM'03: The 9th Int. Conf. on environmental remediation and radioactive waste management, Sept. 21–25, 2003, Examination Schools, Oxford, England.
<https://doi.org/10.1115/ICEM2003-4509>
8. Boldyrev, K.A., Martynov, K.V., Kryuchkov, D.V. et al. Numerical modeling of leaching of aluminophosphate

- glass in the batch mode in the presence of bentonite. *Radiochemistry*, 2019, no. 61, pp. 612–618. <https://doi.org/10.1134/S1066362219050151>.
9. Bunker, B.C. Molecular mechanisms for corrosion of silica and silicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1994, vol. 179, pp. 300–308.
 10. Donald, I.W., Metcalfe, B.L., Taylor, R.N.J. The immobilization of high level radioactive wastes using ceramics and glasses. *Journal of materials science*, 1997, vol. 32, no. 22, pp. 5851–5887.
 11. Godon, N., Gin, S., Minet, Y., Grambow, B. et al. Reference report on the state of the art of glass properties and glass alteration during long term storage and under disposal conditions'. Deliverable 1.1.1 of RTD component 1, Part I. NF-PRO project with the European commission (Contract Number: FI6W-CT-2003-02389), 2005.
 12. Long-term performance of permeable reactive barriers. K.E. Roehl, T. Meggyes, F.G. Simon, D.I. Stewart, Eds. Gulf Professional Publishing, 2005, 244 pages.
 13. Marty, N.C.M. et al. A database of dissolution and precipitation rates for clay-rocks minerals. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 55, pp. 108–118.
 14. Morozov, I. et al. Bentonite–concrete interactions in engineered barrier systems during the isolation of radioactive waste based on the results of short-term laboratory experiments. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 6, pp. 3074.
 15. Parkhurst, D.L. et al. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. 1999.
 16. PNNL-13369. Waste form release calculations for the 2001 immobilized low-activity waste performance assessment. 2001.
 17. PNNL-19736. Integrated disposal facility FY2010 glass testing summary report. September 2010.
 18. Poluektov, P.P. et al. Modelling aqueous corrosion of nuclear waste phosphate glass. *Journal of Nuclear Materials*, 2017, vol. 484, pp. 357–366.

УДК:624.53

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ЗАЩИТЫ НЕПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ОТ ОПОЛЗНЕВОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2024 г. Г. П. Постоев¹,*, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹, Н. А. Орлова¹¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023 г.

После доработки 09.11.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Рассматривается методика защиты стационарного неподвижного объекта (опор высоковольтной сети, канатной дороги, эстакады и т.п.) на активном оползневом склоне. Предложен новый подход организации защитных мероприятий. Он основан на выявленных закономерностях формирования в геологической среде новых структур на локальном участке воздействия на нее. В оползневом массиве при надвиге на неподвижный объект возникают диссипативные геологические структуры, как в грунтовом основании под ленточным фундаментом. В частности, образуются граничные оболочки и ядро по контакту с фронтальной поверхностью неподвижного объекта, в соответствии с его параметрами. Предложена методика, обеспечивающая обтекание объекта оползневыми массами и устойчивое его состояние.

Ключевые слова: технология защиты, опасное давление, оползневой массив, неподвижный объект, модель, ленточный фундамент, диссипативная геологическая структура, ядро, буровая скважина

DOI: 10.31857/S0869780924010043, EDN: GNWJTL

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве инженерных объектов на оползневых склонах возникает много проблем с обеспечением устойчивости сооружений и их защитой от оползневых деформаций. Задача стабилизации оползневого склона и предотвращения развития оползневых деформаций требует осуществления большого комплекса дорогостоящих противооползневых мероприятий и возведения удерживающих сооружений, особенно на протяженных береговых участках с длительной историей развития оползневого процесса. Вместе с тем, нередко на участках склонов с развитием оползневого процесса строят неподвижные объекты в виде отдельно стоящих опор высоковольтной сети, канатной дороги, эстакады и т.п., при этом возникает потребность обеспечения локальной защиты неподвижного объекта от влияния оползневых подвижек. Ниже рассматриваются предложения по защитным мероприятиям, позволяющим осуществлять защиту объектов в широком спектре оползневых участков, в том числе при смещении крупных массивов, на основе учета закономерностей образования в оползневом массиве диссипативных геологических структур (ДГС) по контакту с неподвижным объектом.

Известные способы защиты неподвижного объекта

Обеспечение устойчивости неподвижного объекта на оползневом склоне может быть достигнуто путем устранения оползневых смещений посредством укрепления грунтов склона. Для этой цели применяется для повышения прочности грунтов, например, инъектирование в тело оползня уплотняющего (упрочняющего) раствора [8]. Однако такой способ стабилизации склона может быть эффективен для локальных очагов развития неглубоких оползней. Известен также способ защиты неподвижного объекта, например, в виде сооружения на оползневом склоне перед объектом свайного ростверка, закрепленного в устойчивых грунтах ниже поверхности скольжения и устроенного таким образом, чтобы препятствовать продавливанию оползневых масс в межсвайное пространство и способствовать обтеканию оползневыми массами свай защитного сооружения [2, 7]. К недостаткам данного способа относятся большая трудоемкость и стоимость укрепления склонов (с защитой объектов, расположенных на них) на участках с развитием протяженных относительно глубоких оползней, поскольку для противодействия ожидаемым расчетным величинам оползневого давления потребуются проектирование и устройство

многорядных свайных ростверков между бортовыми границами оползневого участка.

В Кубанском государственном аграрном университете предложен способ (патент SU1647081), предусматривающий снижение оползневого давления на отдельно расположенный объект на оползневом склоне путем бурения скважин и оборудования в них буронабивных свай с созданием стенки, закрепленной в коренных породах в виде складки, вершина которой обращена навстречу перемещению оползня [14]. Защитная стенка воспринимает оползневое давление и направляет движущиеся оползневые массы по боковым сторонам защищаемого объекта для его обтекания. Способ может быть достаточно эффективен при использовании на склонах с развитием относительно неглубоких оползней в покровных разуплотненных отложениях, в которых вследствие малой прочности грунтов обтекание объекта оползневыми массами может быть обеспечено, тогда как на участках развития глубоких оползней с деформированием прочных коренных глин его применение может быть затруднено. Смещение оползневого массива происходит как перед защитной стенкой, так и на участке между стенкой и неподвижным объектом, вызывая рост давления на его фронтальную часть.

Следует отметить, что в оползневом массиве перед неподвижным объектом возникает перестройка напряженно-деформируемого состояния (НДС) смещающихся масс с образованием новых структур, которые влияют на процессы взаимодействия грунтов с объектом.

ОСНОВЫ НОВОГО ПОДХОДА К ЗАЩИТЕ ЛОКАЛЬНОГО НЕПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

В ИГЭ РАН выявлены закономерности образования в геологической среде диссипативных геологических структур (ДГС), как защита ее исходного НДС от внешнего силового возмущения. ДГС формируются вследствие разгрузки напряжений при образовании оползневого блока [10, 12], а также провала над подземной полостью [11] и в грунтовом основании под нагрузкой от фундамента [9].

К настоящему времени получены уравнения предельного состояния ДГС в грунтовом массиве перед развитием разрушительных деформаций. Найден геологический критерий 0.009, который регламентирует преобразование НДС геологической среды в целях защиты от воздействующего геодинамического процесса с переходом от НДС в точках массива по Кулону-Мору к НДС в грунтах граничной оболочки новой крупной структуры (ДГС) [9, 12].

На определенном этапе функционирования ДГС осуществляет вращательное движение, при котором грунты, находящиеся в узкой зоне граничной оболочки, деформируются в режиме скашивания, и при

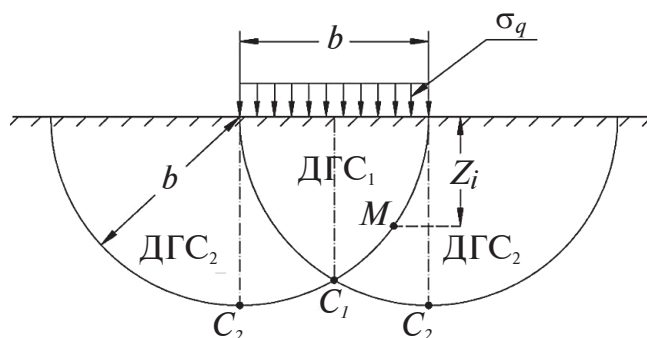


Рис. 1. Схема расположения диссипативных геологических структур в грунтовом основании под нагрузкой от ленточного фундамента шириной b . σ_q — давление на грунтовое основание под подошвой фундамента; ДГС₁ и ДГС₂ — диссипативные геологические структуры в грунтовом основании.

достижении угла поворота 0.009 радиан, когда угол скашивания становится равным 45°, происходит разрушение грунта с разрывом структурных связей, образование поверхности сдвига одномоментно для всей ДГС и ее разрушительное вращательное смещение в виде оползневого блока [12].

Оползневой массив отделен от коренной части геологической среды граничными поверхностями отрыва, скольжения. В нем формируется отличное от коренного массива НДС, связанное с режимом движения отделившихся грунтовых масс. Это состояние является исходным для оползневого массива, как части геологической среды, с проявлением закономерностей по сохранению установившегося НДС.

Неподвижный объект на активном оползневом склоне может рассматриваться как локальное внешнее воздействие, угрожающее изменению исходного состояния смещающегося массива. Проявляется защитная реакция по ограничению влияния объекта на исходное состояние массива, с образованием локальных ДГС по контакту с неподвижным объектом.

Модель неподвижного объекта

Исследования показали, что в качестве модели-аналога неподвижного объекта на активном оползневом склоне может быть рассмотрен ленточный фундамент, нагрузка от которого на грунтовое основание вызывает локальную защитную реакцию геологической среды. Под ленточным фундаментом по мере увеличения нагрузки от сооружения развиваются деформации грунтового основания, при этом в нем образуется ДГС с формированием ядра под подошвой фундамента [9]. А на неподвижный объект происходит надвигание грунтов оползневого массива, в результате которого в итоге возникает горизонтальное давление на его фронтальную поверхность, при этом при обтекании

объекта оползневые массы воздействуют на него и его боковые поверхности.

То есть взаимодействие массива и объекта подобно надвиганию объекта на неподвижный оползневой массив, что имеет место в модели ленточного фундамента при росте давления на грунтовое основание. По фронтальной поверхности объекта возникает лобовое давление (как под ленточным фундаментом), а по боковым границам имеет место обтекание объекта грунтовыми массами (соответственно — пластические деформации по краям фундамента, осадки и выпор грунтового основания). У ленточного фундамента его длина превышает ширину в 10 и более раз (в плане). И заглубленная часть неподвижного объекта также имеет подобное соотношение в вертикальном сечении.

Таким образом, смещающийся (подвижный) оползневой массив является геологической средой, на которую заглубленный неподвижный объект оказывает внешнее давление (воздействие), вызывая образование в оползневом массиве локальных ДГС (как защитной меры для ограничения зоны влияния объекта в пределах ДГС и сохранения установившегося режима формирования НДС в остальной части оползневого массива).

По аналогии с ленточным фундаментом (в данном случае расположенным вертикально, в соответствии с ориентацией и размерами объекта) в оползневом массиве формируются схожие геологические структуры с центральным ядром у фронтальной поверхности объекта (рис. 1, ДГС₁) [9].

По границам ядра и боковым поверхностям фундамента (как неподвижного объекта) происходит основной процесс развития пластических деформаций (обтекание объекта). По обеим сторонам ядра (ДГС₁) по мере повышения давления на фронтальную поверхность объекта формируются боковые ДГС (см. рис. 1, ДГС₂), параметры которых зависят от размеров объекта, в частности ширины b контура его фронтальной части.

Уплотнение грунтов в ДГС практически не происходит. Процессы изменения напряжений и деформаций концентрируются по границам структур. Вначале, как указано выше, деформации концентрируются по границам ядра ДГС₁ под подошвой фундамента (у фронтальной поверхности объекта). Боковые структуры ДГС₂ оказывают сопротивление горизонтальному давлению при перемещении центрального ядра (сдвигения оползневых масс по его границам), играя роль пассивного отпора окружающего грунта. Под фундаментом наземного сооружения (см. рис. 1) начинается процесс выпора боковых зон ДГС₂ из-под его подошвы с разрушительными деформациями в виде просадки сооружения. При этом боковые зоны, как и ядро, смещаются блоками практически с исходной структурой грунтов по криволинейным (в сечении — круговым) границам, по которым

в оболочке ДГС происходит разрыв структурных связей грунта с потерей структурного сцепления и образованием поверхностей сдвига. В ситуации “объект на оползневом склоне” формирование боковых зон заканчивается, когда достигается предельное лобовое давление на фронтальную поверхность неподвижного объекта.

Для ленточного фундамента уравнение предельного равновесия имеет вид [9]:

$$\frac{\gamma b}{m} + \sigma_{str} = (0.866\gamma b - \sigma_{str} + \sigma_{q, cr})m, \quad (1)$$

откуда

$$\sigma_{q, cr} = \gamma b \left(\frac{1}{m^2} - 0.866 \right) + \sigma_{str} \left(\frac{1}{m} + 1 \right), \quad (2)$$

где $\sigma_{q, cr}$ — предельное значение давления на грунтовое основание под подошвой фундамента; γ — среднее значение удельного веса грунтов основания толщи на уровне точек C_2 ; b — ширина фундамента; $m = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{j}{2} \right)$; σ_{str} и ϕ — значения структурной прочности и угла внутреннего трения (для грунта на уровне точек C_1 и C_2 , см. рис. 1).

При взаимодействии оползневого массива и неподвижного объекта также формируются соответствующие ДГС в движущемся массиве (как и под фундаментом), что позволяет использовать уравнение (1) для анализа НДС в локальной зоне массива перед объектом. Из (1) следует, что предельное давление на фронтальную поверхность объекта зависит от величины удельного веса грунтов, ширины объекта, структурной прочности и угла внутреннего трения грунта. При заданных параметрах объекта снижение γ , σ_{str} , ϕ по границам ядра ДГС₁ способствует развитию деформаций по ним и уменьшению давления на фронтальную поверхность объекта. При образовании ДГС в грунтовом массиве основные напряжения и деформации концентрируются в грунтах оболочки по границам структур. То есть, как и в грунтовом основании, в оползневом массиве перед неподвижным объектом деформации концентрируются в грунтах оболочки ядра (в режиме скашивания), причем на допредельном этапе зависимость между деформациями и давлением линейная [9, 12].

По достижении предельного давления на фронтальную поверхность структурное сцепление в грунтах граничной оболочки становится равным нулю. Последующие деформации по границам ядра происходят в виде сдвига с преодолением сил трения, зависящих от величины угла ϕ (этап аномального проседания фундамента). Однако в ситуации с возникновением предельных значений давления на неподвижный объект с проявлением резкой активизации деформаций (в виде “обтекания”) не допустимы для обеспечения устойчивости

и безопасного функционирования проектируемых (существующих) сооружений.

Новые предложения по защите неподвижных объектов на оползневом склоне

На основе выявленных природных закономерностей преобразования НДС геологической среды на участке внешнего силового воздействия на нее, в частности с учетом использования результатов исследований системы “ленточный фундамент — грунтовое основание”, разработана технология защиты неподвижного заглубленного объекта от опасного оползневого давления. Предлагаемая технология осуществляется путем управляемого формирования допускаемого снижения оползневого давления на объект для обеспечения его устойчивости.

Для этой цели выявляются параметры ДГС, которые возникают на участке взаимодействия неподвижного объекта с оползневой массой (рис. 2). В соответствии с системой “ленточный фундамент — грунтовое основание”, как модели-аналога для системы “неподвижный объект — оползневой массив”, на участке размещения объекта определяют границы ДГС, в том числе ядра (в плане), согласно ширине b объекта (по его контуру, нормальному к вектору смещения оползневой массы).

Затем для обеспечения устойчивости объекта и безопасности его функционирования посредством бурения скважин в грунтах граничной оболочки ДГС-ядра контролируют развитие процессов обтекания неподвижного объекта грунтами при смещении оползневой массы.

Предлагаемая технология предназначена для обеспечения устойчивости и безопасного функционирования отдельно стоящих неподвижных объектов на участке активного оползня, в том числе с глубоким расположением поверхности скольжения в прочных коренных глинах, в оползневых очагах преимущественно с развитием оползней типа сжатия-выдавливания. Особенностью блоковых оползней указанного типа является сохранение активных подвижек оползневой тела по почти горизонтальной поверхности скольжения в течение длительного периода времени. При этом смещение продолжается до тех пор, пока дневная поверхность (верхняя площадка) отделившегося от коренного массива оползневой блока не достигнет уровня сформировавшейся оползневой террасы, определяя завершение оползневой цикла на данном участке склона. При естественном развитии оползневой процесса продолжительность цикла активного состояния смещающегося массива может составлять десятки и сотни лет. Это означает, что необходимо обеспечить устойчивость неподвижного объекта (например, опоры дорожной эстакады) на активном оползне в течение длительного времени.

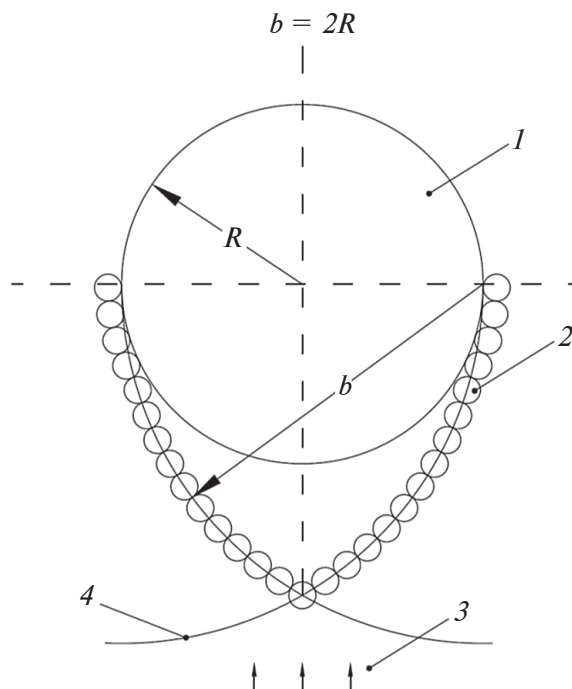


Рис. 2. Положение в плане неподвижного объекта в виде круглой сваи. 1 — неподвижный объект шириной $b = 2R$, 2 — скважина, 3 — направление движения оползневой массы, 4 — граничная поверхность (оболочка) диссипативной геологической структуры.

Обоснование новой технологии

По мере движения оползневой массы увеличивается давление на фронтальную поверхность неподвижного объекта, и растет сила трения по боковым поверхностям объекта при его обтекании оползневой массой. Исследования несущей способности горизонтально нагруженной сваи показали, что доля сил трения в общей величине несущей способности достигает 36% при горизонтальной нагрузке, составляющей 1/3 от предельного значения, затем с ростом нагрузки процентное соотношение постепенно снижается до 10% при предельной несущей способности [1]. Соотношение 10% остается практически постоянным в условиях продолжения дальнейшего смещения грунтов вдоль боковой поверхности объекта.

По данным экспериментальных исследований установлено, что при небольших скоростях нагружения различие результатов испытаний грунта методами ПСН (постоянной скорости нагружения) и ПСД (постоянной скорости деформирования) находятся в допустимых пределах [6]. Также отмечено, что “деформация грунта дискретна, локализована возле группы наиболее крупных пор” [6], и это определяет важность изучения структурных элементов грунтового массива.

Таким образом, на активном оползневом склоне вследствие смещения оползневой массы неизбежно его силовое воздействие на неподвижный

объект, закрепленный в устойчивых грунтах, расположенных ниже поверхности смещения оползня. Лобовое давление оползневых масс на объект должно быть как минимум выше структурной прочности (предела прочности на одноосное сжатие) грунта, чтобы начались деформационные процессы и обтекание объекта. В соответствии с нормативными документами (СП 50-101-2004¹), расчетное сопротивление глинистых грунтов оснований (практически среднее значение лобового давления на объект) в зависимости от их пористости и состояния текучести находится в пределах 0.1–0.5 МПа.

Оползневое давление на участках развития глубоких блоковых оползней, в связи с достаточно высокой прочностью и плотностью грунтов оползневого массива, может создать опасные горизонтальные нагрузки на объект. Как показали испытания на сдвиг и одноосное сжатие образцов меотических глин, отобранных на оползневых склонах Одессы [4], при напряжениях τ , не превышающих 80% предельных значений (применительно к длительному периоду изменения напряжений в массиве, что имеет место в развитии глубоких оползней), существенных изменений НДС грунтового слоя массива происходить не может (рис. 3).

То есть, с одной стороны, независимо от скорости нагружения или скорости деформирования грунта при допредельных значениях напряжений рано или поздно все же наступает этап, когда предельное состояние достигается, в результате чего возникают разрушительные деформации. С другой стороны, при меньшей скорости деформирования грунта и интенсивности роста давления на грунт период допредельных изменений деформаций и напряжений возрастает.

При анализе формирования НДС в грунтах вблизи неподвижного объекта на оползневом склоне следует также иметь в виду, что его обтекание оползневыми массами происходит в основном по боковой поверхности [7], при этом, как указано выше, силы трения составляют ~10% в общей величине несущей способности сваи на горизонтальное давление [1].

Особенности учета ДГС при надвиге оползневых масс на неподвижный объект

Научные и экспериментальные исследования, анализ результатов натуральных наблюдений за развитием разрушительных деформаций на участках проявления блоковых оползней показывают, что относительное значение критической деформации (при предельном давлении $\sigma_{q, cr}$), предшествующее разрушительному процессу смещения грунтов, составляет 0.009 [3, 9, 12]. Применительно

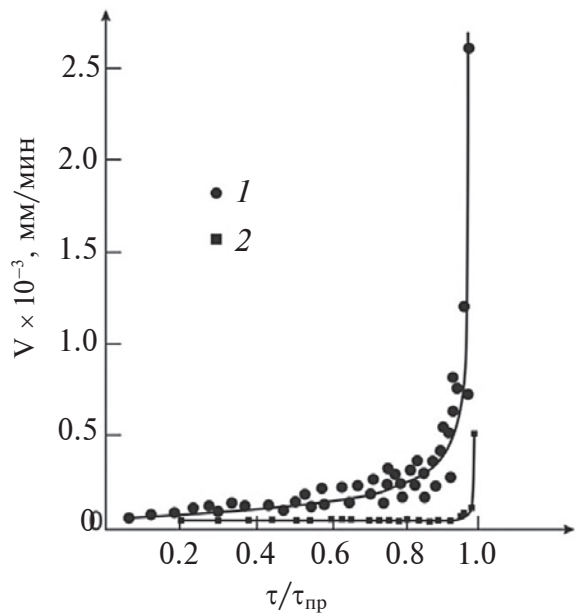


Рис. 3. Графики зависимости скорости ползучести от уровня напряжений при различном темпе нагружения глинистого грунта в испытаниях на сдвиг [4]. 1 — испытание по схеме ступень — час, 2 — по схеме ступень — сутки.

к взаимодействию оползневого массива и неподвижного объекта в допредельном режиме в процессе движения оползня давление на фронтальную поверхность объекта увеличивается от значения давления грунта в точке (в начальный момент) до предельного давления, предшествующего процессу интенсивного обтекания объекта (по аналогии разрушительных деформаций фундамента).

Исходное давление грунта на неподвижный объект (по аналогии с моделью “фундамент — грунтовое основание”) определяется как давление p_i грунта в точке массива на глубине Z_i (см. рис. 1) [9–12]:

$$p_i = (\gamma Z_i - \sigma_{str, i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right). \quad (3)$$

Ядро ДГС₁, так же как и объект, находится в неподвижном состоянии (см. рис. 1). При движении оползневого массива по границе ядра формируется оболочка толщиной h , в соответствии с геологическим критерием 0.009 [9, 12]:

$$h = 0.009b. \quad (4)$$

Оболочка представляет собой узкую зону (при $b = 2$ м, $h = 0.018$ м), в грунтах которой в условиях компрессионного сжатия происходят основные изменения НДС в новой ДГС, как в замкнутом крупном образовании в геологической среде, в данном

¹ СП 50-101-2004 “Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений”. <https://docs.cntd.ru/document/1200038307>

случае — в оползневом массиве (специфической части геологической среды). В грунтах оболочки (в узкой зоне) и особенно ядра ДГС₁ возникают напряжения, в 1/0.009 раз (т.е. более чем на два порядка) превышающие давление в точке по (3).

Таким образом, в движущемся оползневом массиве перед неподвижным объектом шириной b возникают ДГС (см. рис. 1, 2), по границам которых происходит концентрация напряжений, определяющих условия деформирования грунтов в оболочке в режиме скашивания. По мере деформации грунтов в оболочке увеличивается давление оползневого массива на неподвижный объект. Критическое значение давления $\sigma_{q, cr}$, в соответствии с (2), достигается, когда перемещение в оболочке ДГС₁ становится равным $\Delta l = h = 0.009b$ [9, 12].

Технология выполнения работ

На склоне с развитием глубоких подвижек оползневого массива в виде крупных блоков с частично сохранившейся исходной структурой грунтов коренного залегания планируется строительство неподвижного локального объекта, заглубленная часть которого закреплена в прочных грунтах ниже поверхности скольжения оползня. По данным инженерных изысканий, проектных решений и мониторинга развития оползневых деформаций на оползневом склоне, в соответствии с нормативными документами, определяют: тип оползня по механизму, направление и среднюю скорость смещения оползневого массива, глубину положения в разрезе поверхности скольжения на участке расположения неподвижного заглубленного объекта.

По формуле (3) определяют исходное значение давления на глубине Z_i в точке массива, в том числе на неподвижный объект при отсутствии деформаций оползневого массива (как бы при расположении объекта в устойчивом массиве). По данным мониторинга выявляют активность оползневого процесса на участке, наличие деформаций грунтов перед объектом. Надвигание оползневого массива на неподвижный объект вызывает деформирование грунта в граничных оболочках ДГС, возникших перед объектом.

В целях предотвращения роста давления на неподвижный объект до опасных значений и обеспечения безопасного обтекания объекта оползневыми массами выполняют следующие процедуры и мероприятия.

Определяют параметры локальных ДГС перед неподвижным объектом. Перед сечением заглубленной части фронтальной поверхности объекта размечают расчетные границы ДГС-ядра в виде дуг окружностей радиусом b (дуги — как границы ДГС₁, на рис. 2), с центрами в крайних точках фронтальной поверхности контура b , и расчетных дуг расположения центров буровых скважин радиусом

$$\left(b + \frac{d}{2}\right), \quad (5)$$

где d — диаметр скважины, м.

Протяженность каждой из расчетных дуг от основания шириной b до точки пересечения дуг на оси ядра, удаленной от основания на расстояние $0.866b + d/2$, равна:

$$L = \frac{\pi \left(b + \frac{d}{2}\right)}{3}. \quad (6)$$

Устанавливается расположение скважин перед фронтальной поверхностью объекта, с размещением осей скважин по границе ДГС-ядра. Количество скважин, стенки которых касаются между собой, определяют по формуле:

$$n = \frac{2\pi \left(b + \frac{d}{2}\right)}{3d}. \quad (7)$$

Определяют время, в течение которого обеспечивается безопасное значение оползневого давления на неподвижный объект и возможность его обтекания оползневыми массами:

$$t = \frac{d}{v}, \quad (8)$$

где t — время безопасного функционирования неподвижного объекта, мес; d — диаметр скважины, м; v — средняя скорость смещения оползня в течение периода t , м/мес.

По границам ядра (см. рис. 2) осуществляют бурение скважин, диаметром d каждая, до глубины залегания поверхности скольжения в данном месте оползневого массива, при этом оси скважин располагают по дуге $(b + d/2)$, а стенки скважин касаются друг с другом и с внутренней границей оболочки ДГС в виде дуги радиусом b .

В соответствии с результатами теоретических исследований толщина h оболочки по границе ДГС-ядра (см. рис. 2) составляет $h = 0.009b$. Полости скважин увеличивают толщину граничной оболочки ДГС-ядра, преобразуют деформирование грунта по границе ДГС-ядра в сжатие и скашивание пустот, образованных скважинами. При этом снижается сопротивление грунта сдвигу по граничной оболочке ДГС и боковой поверхности объекта.

Смещение оползня вызывает смятие пустот по граничной расширенной оболочке ДГС, образованной скважинами, без роста давления грунтов на фронтальную поверхность глубинной части неподвижного объекта в пределах мощности оползневого тела. При этом ядро, как и неподвижный объект, остается в исходном стабильном состоянии с сохранением исходного давления в грунтах внутри ядра и на поверхности объекта, обеспечивая его устойчивость в массиве. Деформации в этой части

грунтового массива происходят только по границе ядра в виде сжатия, смятия и скашивания полостей скважин, сдвигов грунта, обтекания массива ДГС-ядра и неподвижного объекта. Наличие пустот позволяет снизить сопротивление обтеканию путем смятия пустотных объемов и предотвратить формирование опасного горизонтального давления на фронтальную поверхность объекта. Для предотвращения заплывания пробуренных скважин грунтом можно вставить в них пластиковые трубы.

На фронтальной поверхности неподвижного объекта могут быть установлены датчики для контроля изменений контактного давления оползневого массива на него. При этом по данным о повышении давления, установленного по результатам контроля, можно регулировать сроки бурения скважин и их количество (начиная с меньшего количества скважин).

По границам ДГС-ядра перед объектом и по боковым поверхностям объекта могут производиться работы по повышению эффективности их обтекания оползневыми массами, например, путем инъекции в грунты нейтральной смеси или применения других средств, позволяющих снизить сопротивление трению в грунтах в зоне сдвига.

Следует отметить, что согласно модели “фундамент — грунтовое основание” (см. рис. 1) на допредельном этапе деформирования, когда $\sigma_{q,i} < \sigma_{q,cr}$ абсолютные значения текущей осадки S фундамента и, соответственно, деформаций ДГС весьма малы, и при ширине ленточного фундамента $b = 2$ м критическое значение осадки (при $\sigma_{q,i} = \sigma_{q,cr}$) составит всего $S_{cr} = 0.018$ м, согласно критерию:

$$S_{cr} = \Delta l_{cr} = h = 0.009b. \quad (9)$$

При этом текущие значения смещений будут еще меньше (миллиметры).

Для определения предельной величины давления ленточного фундамента шириной b на грунтовое основание по уравнению (2) требуется информация о механических свойствах (включая γ , ϕ , c и σ_{str}) грунтов (на глубине $Z_i \approx b$ по рис. 1), или в соответствии с предлагаемым способом в оползневом массиве — на расстоянии b от фронтального контура неподвижного объекта. Принимая линейную зависимость (в модели) между давлением фундамента σ_q и относительной его осадкой на допредельном этапе состояния грунтового основания, и переходя к взаимодействию оползневого массива и неподвижного объекта, можно определить текущее значение S_i перемещения оползневого массива в соответствии с критерием (9) и уравнением (2):

$$S_i = \Delta l_i = \frac{0.009b \sigma_{q,i}}{\sigma_{q,cr}}, \quad (10)$$

при этом основные деформации на допредельном этапе происходят по границам ядра (см. рис. 1, 2).

Пример расчета при реализации предлагаемой технологии на конкретном объекте

Например, на оползневом склоне создается неподвижный объект — опора в виде сваи диаметром 2 м, заглубленной в устойчивые коренные породы. По данным изысканий и мониторинга по оползневому склону получена следующая информация:

- мощность оползня у сваи — 10 м;
- средняя скорость смещения оползня 0.2×10^{-3} м/мес;
- характеристики прочности грунтов: угол внутреннего трения $\phi = 14.5^\circ$; сцепление $c = 99.5$ кПа; структурная прочность, соответственно, $\sigma_{str} = 257.5$ кПа.

Предельное значение горизонтального давления на сваю диаметром 2 м при указанных выше параметрах прочности грунта по (2) составит $\sigma_{q,cr} = 763.6$ кПа.

Геостатическое давление на сваю при указанных выше показателях прочности грунта в исходном состоянии, определяемое как давление в точке грунта по (3) в пределах мощности массива до глубины 10 м практически отсутствует, так как компенсируется прочностью структурных связей.

Песчаная засыпка пазух, образуемых при бурении скважин, согласно СП 11-105-97² имеет $\gamma = 16$ кН/м³; $\phi = 28^\circ$. При таких характеристиках давление грунта по (3) на глубине 10 м составит 57.8 кПа. А при допущении среднего значения удельного веса грунтов засыпки 20 кН/м³ соответствующее давление по (3) составит 72.2 кПа. В этом случае можно принять, что допускаемое давление ($|\sigma_q|$) оползневых масс не должно превышать $0.1\sigma_{q,cr}$ т.е. $|\sigma_q| \approx 76$ кПа.

В результате движения оползня перед неподвижной сваем формируется ДГС-ядро. Основанием ядра является диаметр сваи 2 м, нормально ориентированный к направлению смещения оползневого массива. Устанавливаются границы ядра — дуги окружностей радиусом 2 м с центрами в краевых точках упомянутого диаметра, длина каждой дуги составляет $\pi b/3 = 2.09$ м.

При отсутствии инженерной защиты горизонтальное давление $\sigma_{q,i}$ на сваю достигнет критического значения $\sigma_{q,cr}$ при смещении оползня у сваи на величину $0.009b$ (или 18 мм) и средней скорости 0.2×10^{-3} м/мес через 7.5 лет. Но допускаемое значение горизонтального давления $|\sigma_q|$, при той же скорости смещения оползня, может реализоваться гораздо раньше. При $|\sigma_q| = 0.1\sigma_{q,cr}$ этот срок может составить 9 месяцев.

При бурении скважин по границам ядра происходит разгрузка исходного распорного давления в ядре как по его границам, так и по фронтальной

² <https://docs.cntd.ru/document/1200037607>.

поверхности объекта, вследствие снижения напряжений в точках массива ядра в сторону разгрузочных скважин и, соответственно, снижения отпора.

Итак, скорость смещения оползня $v = 0.2 \cdot 10^{-3}$ м/мес.; ширина объекта $b = 2$ м; значение допускаемого давления $|\sigma_q| = 0.1\sigma_{q, cr} \approx 76$ кПа; диаметр скважин, расположенных по контуру ядра, $d = 146 \cdot 10^{-3}$ м. Стенки скважин касаются друг друга и границ ядра с внешней стороны.

Таким образом, при количестве скважин по (7), равном 31 шт., продолжительность периода, в пределах которого обеспечивается безопасное значение горизонтального давления на сваю, составит $t = d/v = 60$ лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая технология оперативной защиты стационарного неподвижного объекта (опор высоковольтной сети, канатной дороги, эстакады и т.п.) на активном оползневом склоне.

Новый подход к организации защитных мероприятий базируется на выявленных закономерностях самоорганизации геологической среды на участке внешнего силового воздействия. На оползневом склоне в качестве исходной геологической среды выступает оползневой массив. Оползневой массив отделен от коренной части геологической среды граничными поверхностями скольжения (отрыва). В нем формируется НДС, отличное от НДС коренного массива, связанное с режимом движения отделившихся грунтовых масс. Это состояние является нормальным для оползневого массива, как части геологической среды с проявлением закономерностей по сохранению установившегося НДС.

Неподвижный объект на активном оползневом склоне может рассматриваться как локальное внешнее воздействие, угрожающее изменению исходного состояния смещающегося массива. Проявляется защитная реакция по ограничению влияния объекта на исходное состояние массива — образование локальных ДГС в оползневом массиве по контакту с неподвижным объектом.

В качестве модели-аналога неподвижного объекта рассмотрен ленточный фундамент, и использованы установленные для него закономерности по оценке предельного давления, образования ДГС-ядра и функционирования ДГС в динамике взаимодействия фундамента (неподвижного объекта) и грунтового основания (оползневого массива у границы с объектом).

Предложенная технология предусматривает бурение скважин по установленной граничной поверхности ДГС-ядра с образованием пустот для снижения сопротивления движению оползневых масс и обеспечения обтекания неподвижного

объекта грунтами без повышения оползневого давления на него до опасных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буслов А. С., Зехниев Ф. Ф., Бакулина А. А., Моховиков Е. С., Монахов И. А. К вопросу о влиянии поперечного сечения горизонтально нагруженной сваи на суммарные величины бокового отпора и трения грунта // Вестник НИЦ "Строительство". 2017. № 2 (13). С. 155–166.
2. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции. М.: Стройиздат, 1979. 80 с.
3. Демин А. М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
4. Жихович В. В. О наличии оползней выдавливания на склонах одесского побережья // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 7–11.
5. Казанкова Э. Р., Корнилова Н. В. Структурирование геологической среды на различных уровнях организации // Актуальные проблемы нефти и газа. Вып. 1(20). 2018. С. 1–15.
6. Кравченко Э. В., Денисенко В. В., Будагов И. В., Ляшенко П. А. Анализ методов испытаний грунтов постоянной скоростью нагружения и постоянной скоростью деформации // Оценка свойств грунтов и работы фундаментов в геотехническом строительстве. Краснодар: КубГАУ, 2018. С. 36–44.
7. Маций С. И. Противооползневая защита: монография. Краснодар: АлВи-дизайн, 2010. 288 с.
8. Осипов В. И., Филимонов С. Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом "Геокompозит" // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 5. С. 15–21.
9. Постоев Г. П. Диссипативные геологические образования и модели оценки предельного состояния грунтовых оснований // Геоэкология. 2021. № 2. С. 41–48.
10. Постоев Г. П. Диссипативные структуры в грунтовом массиве на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. Т. XIII. 2018. № 3. С. 54–61.
11. Постоев Г. П. Модели механизма формирования и расчета параметров провалов земной поверхности над подземными полостями // Геоэкология. 2020. № 4. С. 36–47.
12. Постоев Г. П., Казеев А. И., Кучуков М. М. Поведение грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока // Грунтоведение. 2022. № 2. С. 58–64.
13. Пригожин И. Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Едиториал УРСС, 2003. 312 с.
14. Противооползневое сооружение. А.с. SU1647081. 1991. Авторы: К. Ш. Шадунц, С. И. Маций, В. В. Елистратов

NEW TECHNOLOGY OF PROTECTING A STATIONARY ENGINEERING STRUCTURE FROM LANDSLIDE PRESSURE

G. P. Postoev^{a, #}, A. I. Kazeev^a, M. M. Kuchukov^a, N. A. Orlova^a

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

[#]*E-mail: opolzen@geoenv.ru*

The methodology of protecting stationary objects (foundations of high-voltage network, cable road, overpasses, etc.) located on an active landslide slope is considered. A new approach to implementation of protective measures is proposed. It is based on the identified features of formation of new geological structures in the ground massif at the local area of technogenic impact. Dissipative geological structures develop in the landslide massif upon its thrusting on a immobile object. In particular, a core and boundary envelopes are formed at the contact with the frontal surface of the object, in accordance with the parameters of the latter. A methodology is proposed to ensure the flow of landslide masses around the object and its stability.

Keywords: *protection technology, hazardous pressure, landslide massif, immobile object, model, strip foundation, dissipative geological structure, core, borehole*

REFERENCES

1. Buslov, A.S., Zekhniev, F.F., Bakulina, A.A., Mikhovikov, E.S., Monakhov, I.A. [To the question of the influence of the cross-section of a horizontally loaded pile on the total values of lateral repulsion and soil friction]. *Vestnik NITs "Stroitel'stvo"*, 2017, no. 2(13), pp. 155–166. (in Russian)
2. Ginzburg L.K. [Landslide-control retaining structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 80 p. (in Russian)
3. Demin, A.M. [Landslides in quarries: analysis and forecast]. Moscow, GEOS Publ., 2009, 79 p. (in Russian)
4. Zhikhovich V.V. [About extrusion landslides on the slopes of Odessa coast]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2007, no. 5, pp. 7–11. (in Russian)
5. Kazankova, E.R., Kornilova, N.V. [Structuring of geological environment at different levels of organization]. *Aktual'nye problemy nefii i gaza*, 2018, vol. 1(20), pp. 1–15. (in Russian)
6. Kravchenko, E.V., Denisenko, V.V., Budagov, I.V., Lyashenko, P.A. [Analysis of the methods for testing the soils with constant loading rate and constant strain rate]. In: Collection of articles [Evaluation of soil properties and operation of foundations in geotechnical construction]. Krasnodar, KubGAU Publ., 2018, pp. 36–44. (in Russian)
7. Matsiy, S.I. [Landslide-control measures]. Krasnodar, AIVI-design Publ., 2010, 288 p. (in Russian)
8. Osipov, V.I., Filimonov, S.D. [Compaction and reinforcement of weak soils by the method "Geocomposite"]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2002, no. 5, pp. 15–21. (in Russian)
9. Postoev, G.P. [Dissipative geologic formations and models for estimating the limit state of the ground bases]. *Geoekologiya*, 2021, no. 2, pp. 41–48. (in Russian)
10. Postoev, G.P. [Dissipative structures in the ground massif on the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
11. Postoev, G.P. [Models of the formation mechanism and calculation of the parameters of land surface failures over underground cavities]. *Geoekologiya*, 2020, no. 4, pp. 36–47. (in Russian)
12. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. [Behavior of soils and dissipative geological structures during landslide block formation]. *Gruntovedenie*, 2022, no. 2, pp. 58–64. (in Russian)
13. Prigozhin, I.R., Stengers, I. [Order out of chaos]. M., Unitorial Urss Publ., 2003, 312 p. (in Russian)
14. Landslide-control construction. Certificate of authorship SU1647081, 1991, Authors: K.Sh. Shadunts, S.I. Matsiy, V.V. Elistratov (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.348.436

СЕЙСМИЧНОСТЬ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТЕРРИТОРИИ
СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ© 2024 г. А. Ю. Осипова¹, *, В. Ю. Осипов¹, Д. Д. Бызов¹¹Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН)
ул. Амундсена, 100, Екатеринбург, 620016 Россия

*E-mail: seismolab@mail.ru

Поступила в редакцию 31.07.2023 г.

После доработки 13.09.2023 г.

Принята к публикации 18.09.2023 г.

Строительство объектов повышенного уровня ответственности и особо ответственных объектов на территории Свердловской области необходимо выполнять с учетом результатов работ по уточнению исходной сейсмичности. Для целей детального сейсмического районирования территории были выполнены сейсмологические исследования. На основе обобщенных исторических и инструментальных каталожных материалов за период 1788–2022 гг. составлен сводный унифицированный каталог тектонических землетрясений Уральского региона. В статье приведено определение параметров сейсмического режима территории Свердловской области — построен график повторяемости, оценен уровень сейсмической активности исследуемого региона, определена глубина залегания сейсмоактивного слоя и построена матрица сейсмической активности $A_{3,3}$. Установлено, что сейсмическая активность территории слабая, наиболее высокие значения $A_{3,3}$ наблюдаются в западной ее части.

Ключевые слова: каталог землетрясений, график повторяемости, сейсмическая активность, сейсмический режим, магнитуда

DOI: 10.31857/S0869780924010052, EDN: GNWHYS

ВВЕДЕНИЕ

Территория Свердловской области расположена в пределах крайней восточной окраины Восточно-Европейской платформы, средней, северной частей Уральской горно-складчатой системы и западной части Западно-Сибирской плиты. В настоящее время на территории области ежегодно регистрируется порядка 400 сейсмических событий разной природы — взрывы, горные удары, горно-тектонические события и тектонические землетрясения, последние из которых происходят редко. За период 1788–2022 гг. на территории области было отмечено порядка 30 тектонических землетрясений силой до 5.0–6.0 баллов по шкале MSK-64 в эпицентрах. Из них только одно событие — Билимбаевское землетрясение 17.08.1914 г. ($M_S = 5.0$, координаты эпицентра 57.09° с.ш., 59.80° в.д.) имело в эпицентре силу порядка 6.0 баллов по шкале MSK-64. За этот период было отмечено еще порядка 11 землетрясений, сила сотрясения в эпицентре во время которых оценивается ~4.0–5.0 баллов по шкале MSK-64, а магнитуда — от 3.0 до 4.7 [1–4, 7, 9, 13, 14, 17, 26, 27].

В последние годы наиболее сильные землетрясения на территории Свердловской обл. были зарегистрированы 29.03.2010 г. ($M_S = 3.9$; координаты

эпицентра 58.85° с.ш., 59.17° в.д.) в 25 км к северо-западу от г. Качканар и 18.10.2015 г. ($M_S = 4.4$; координаты эпицентра 57.13° с.ш., 58.83° в.д.) в районе пос. Сабик Шалинского района, приблизительно в 40 км к западу-северо-западу от Билимбаевского землетрясения [2, 5, 6, 8, 11, 12, 26].

Свердловская область — активно развивающийся регион с большим количеством горнодобывающих предприятий, промышленных заводов, соседствующих с крупными городами. Помимо тектонических землетрясений на рассматриваемой территории регистрируется большое количество техногенных сейсмических событий (взрывы, горные и горно-тектонические удары). В связи с этим детальное сейсмическое районирование территории актуально для обеспечения сейсмической безопасности населения, существующих и планируемых к строительству зданий, сооружений. Основой сейсмического районирования является каталог землетрясений, однородный (унифицированный) по содержанию и представительный (на уровне современной изученности) для всей исследуемой территории.

Цель данной работы — составление сводного унифицированного каталога тектонических землетрясений, произошедших за период 1788–2022 гг. в исследуемом регионе, а также оценка сейсмического режима территории Свердловской области.

Исходные сейсмологические материалы

Область сейсмологических исследований определяют исходя из условия, что объект или территория, подлежащие оценке сейсмической опасности, располагались внутри этой области на расстоянии не менее 200 км от ее границ [23]. Сводный каталог тектонических землетрясений составляют в пространственных границах, выбранных в зависимости от степени изученности “окружающего” района и уровня сейсмичности, как правило, в радиусе не более 300 км от объекта.

Источниками для составления сводного унифицированного каталога тектонических землетрясений с эпицентрами в пределах района исследования послужили:

- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.) [1];
- Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. [7];
- База данных “Землетрясения России” с 2003 г. по 2022 г. [2];
- Информация Службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН [13];
- База данных сейсмологического мониторинга Западного Урала [26];
- Геофизические обсерваторские исследования на Урале [17].

Данные, содержащиеся в перечисленных выше каталогах, были подвергнуты взаимной проверке с целью взаимного дополнения источников и исключения недостоверной информации. В рассматриваемых сейсмологических каталогах часто приводятся разные магнитуды (m_b , M_L , M_S), и (или) указан энергетический класс сейсмического события (K). Для составления сводного унифицированного каталога тектонических землетрясений Свердловской обл., прежде всего, была проведена работа по выборке из всех землетрясений только тектонических (исключены взрывы, горно-тектонические удары, импактные события, афтершоки). Магнитуды сейсмических событий были унифицированы, т.е. приведены к одной магнитуде — M_S .

В ежегодниках “Землетрясения России” [2] расчет магнитуды M в сводных каталогах сейсмических событий производится из значений магнитуд и энергетических классов, публикуемых в Сейсмологических бюллетенях ФИЦ ЕГС РАН и региональных каталогах подразделений ФИЦ ЕГС РАН по приведенным формулам в табл. 1.

Анализ сейсмического режима территории Свердловской области

Для анализа сейсмического режима территории Свердловской обл. использовался сводный унифицированный каталог, который насчитывал 156 тектонических событий магнитудой $M_S \leq 5.3$

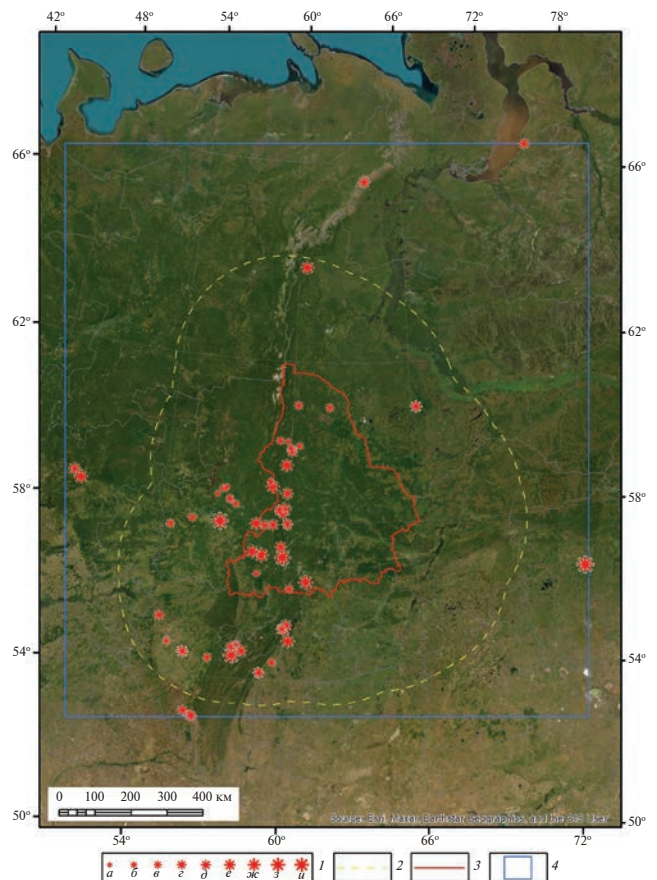


Рис. 1. Схема расположения эпицентров тектонических землетрясений ($1.4 \leq M_S \leq 5.3$) за период 1788–2022 гг. Условные обозначения: 1 — эпицентры тектонических событий, магнитудой M_S (шаг 0.5 ± 0.2): а — 1.5, б — 2.0, в — 2.5, г — 3.0, д — 3.5, е — 4.0, ж — 4.5, з — 5.0, и — 5.5; 2 — граница, соответствующая буферной зоне 300 км от административной границы Свердловской обл.; 3 — административная граница Свердловской обл.; 4 — территория расчета матрицы сейсмической активности $A_{3,3}$.

и охватывал период времени 1788–2022 гг. Предварительно из него были исключены афтершоки сильных и умеренных ($M_S \geq 3.8$) тектонических землетрясений, поскольку их учет искажает параметры графика повторяемости и значения сейсмической активности [25]. В Уральском регионе афтершоки были зарегистрированы от двух землетрясений: 29.03.2010, $M_S = 3.9$ — г. Качканар; 04.09.2018, $M_S = 5.0$ — г. Катав-Ивановск. После исключения афтершоков сводный унифицированный каталог насчитывал 67 сейсмических событий с магнитудами $1.4 \leq M_S \leq 5.3$. На рис. 1 приведена схема расположения эпицентров этих тектонических землетрясений за период 1788–2022 гг.

В табл. 2 дано распределение числа событий в каталоге по годам и магнитудам (жирным шрифтом выделены периоды представительных наблюдений для различных магнитуд). Для всей рассматриваемой территории ниже представителем

магнитудой была признана $M_S = 2.5$ (в период 2001–2022 гг.).

После уточнения периодов представительной регистрации различных магнитуд в соответствии с табл. 2 был сформирован сводный представительный каталог землетрясений региона, насчитывающий 50 событий в интервале магнитуд $2.5 \leq M_S \leq 5.5$ за период 1788–2022 гг., который использовался при построении графика повторяемости.

График (закон) повторяемости

Один из ключевых законов сейсмологии — Гутенберга-Рихтера [28], описывающий зависимость логарифма числа событий с определенной магнитудой в некотором регионе от величины этой магнитуды. Эмпирически было выявлено, что эта зависимость линейная:

$$\lg N = a - b \cdot M \quad (1)$$

где N — число событий с магнитудой M , a и b — константы.

Сама эта зависимость обычно называется частотно-магнитудным распределением либо

графиком повторяемости, а коэффициент b — наклоном графика повторяемости, либо b -value. Этот параметр несет смысл соотношения между числом событий с малыми и большими магнитудами, т. е. чем больше его значение, тем больше малых событий по сравнению с большими.

Наклон графика повторяемости землетрясений имеет большое теоретическое и практическое значение и может, в частности, использоваться для прогноза сильных землетрясений. Для этой цели необходимо анализировать изменение параметра b -value во времени. Перед большим землетрясением значение параметра b -value уменьшается с последующим увеличением после землетрясения [22]. Известно также, что величина параметра b -value зависит от тектонического напряжения в среде, изменений температуры, порового давления и степени неоднородности среды и, соответственно, может нести в себе информацию об этих величинах. Поэтому подобные исследования актуальны для изучения природы сейсмичности, а также процессов, происходящих в недрах.

Для целей сейсмического районирования число событий в каждом интервале магнитуд

Таблица 1. Расчет магнитуды M (M_{LH} , M_S) [2]

Регион Код центра	Формула расчета M	Глубина h , км	Условия применения	Автор	Период применения формулы
Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь. Восточная часть Балтийского щита					
GSRAS	$M = M_S$	≤ 70	определена M_S	[16]	2003–2020 гг.
	$M = M_S + 0.8$	> 70	определена M_S	[16]	2003–2008 гг.
	$M = 1.59 MPLP - 3.97$	≤ 70	нет M_S	[16]	2003–2012 гг.
	$M = 1.59 MPSP - 3.67$	≤ 70	нет M_S	[16]	2003–2019 гг.
VMGSR	$M = (K_p - 4)/1.8$			[20, 21]	2003–2019 гг.
KOGSR	$M = 1.43 M_L - 0.02 M_L^2 - 2.1$			[15]	2003–2009 гг.
	$M \approx M_L - 0.2$				2010–2013 гг.
	$M \approx M_L$				2014–2020 гг.
OBGSR	$M \approx M_L$				2010–2020 гг.
MIRAS	$M \approx M_L$				2003–2007 гг. 2014–2017 гг.
	$M \approx M_L - 0.5$				2008–2013 гг.
	$M = (K_p - 4)/1.8$			[20, 21]	2014–2020 гг.
	$M = 0.9 M_L$				2018–2020 гг.
IDG	$M \approx M_L - 0.5$				2005–2020 гг.
FCIAR	$M \approx M_L$				2013–2020 гг.
IGKRC	$M \approx M_L$				2017–2020 гг.
IGKR	$M \approx M_L$				2017–2020 гг.
	$M = M_S$				2020–

Таблица 2. Распределение числа событий в каталоге по годам и магнитудам

Годы	M_s (шаг 0.5 ± 0.2)									N
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	
1701–1800	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
1801–1850	0	0	0	1	2	2	1	0	0	6
1851–1900	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2
1901–1950	0	0	1	0	1	1	0	1	1	5
1951–2000	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3
2001–2005	1	2	1	2	3	0	0	0	0	9
2006–2010	0	0	3	3	1	1	0	0	0	8
2011–2015	2	4	5	6	2	1	1	0	0	21
2016–2020	2	2	4	1	0	0	0	1	0	10
2021–2022	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
N	5	9	14	14	10	8	3	2	2	67
N_{repr}			13	12	10	8	3	2	2	50

нормируется на свой период представительной регистрации T_{repr} , так что:

$$\lg N / T_{repr} = -b \cdot M_s + a \quad (2)$$

Параметр N / T_{repr} — это среднее число событий за год в соответствующем интервале магнитуд. График повторяемости оценивает средний период повторения землетрясений с данной магнитудой на территории детального сейсмического районирования. Под периодом представительной фиксации землетрясений T_{repr} определенного интервала магнитуд понимается период времени, в течение которого землетрясения в пределах этого интервала магнитуд фиксируются без пропусков на рассматриваемой территории. При этом дискретизация шкалы магнитуд проводится через 0.5 единицы магнитуды с центральными значениями 3.0; 3.5; 4.0; и т.п., а соответствующие им интервалы магнитуд: 2.8–3.2; 3.3–3.7; 3.8–4.2 и т.д. [23].

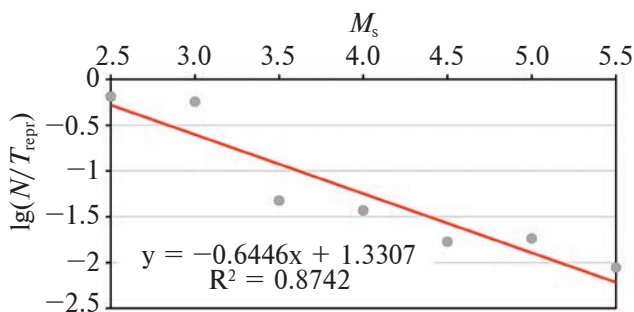


Рис. 2. Региональный график повторяемости в интервале магнитуд $2.5 \leq M_s \leq 5.5$ по материалам за период 1788–2022 гг.

В табл. 3 события сводного представительного каталога землетрясений разнесены по числу событий в соответствующих интервалах магнитуд с учетом периода их представительного наблюдения.

На основании данных табл. 3 методом линейной ортогональной регрессии был построен ненормированный график повторяемости, дающий представление о средних периодах повторения землетрясений соответствующих магнитуд на всей рассматриваемой территории по каталогам за период 1788–2022 гг. (рис. 2).

В аналитической форме график повторяемости имеет вид:

$$\lg(N/T_{repr}) = -(0.6446 \pm 0.1093) \cdot M_s + (1.3307 \pm 0.4508), R_c = 0.93499. \quad (3)$$

Весьма высокий коэффициент линейной корреляции $R_c = 0.93499$ свидетельствует о достаточно высокой надежности полученного результата.

Таблица 3. Распределение числа событий по интервалам представительных наблюдений и магнитудам

M_s (шаг 0.5 ± 0.2)	Годы	T_{repr} лет	N	N/T_{repr}	$\lg(N/T_{repr})$
2.5	2003–2022	20	13	0.6500	-0.1871
3.0	2002–2022	21	12	0.5714	-0.2430
3.5	1813–2022	210	10	0.0476	-1.3222
4.0	1809–2022	214	8	0.0374	-1.4273
4.5	1847–2022	176	3	0.0170	-1.7684
5.0	1914–2022	109	2	0.0183	-1.7364
5.5	1798–2022	225	2	0.0089	-2.0512

Из анализа графика повторяемости (см. рис. 2) можно сделать вывод, что тектонических землетрясений в рассматриваемом регионе происходит достаточно мало. Их зафиксированная представительная магнитуда на сегодняшний день $2.5 \leq M_S \leq 5.5$, и происходили они за период 1788–2022 гг. в среднем с периодичностью менее 1 события в год, на что указывают отрицательные значения $\lg(N/T_{repr})$. Параметр b -value получился равным 0.6446, что меньше, чем в сейсмичных регионах, например, на Северном Кавказе, где этот параметр составляет 0.957 [18]. Это указывает на то, что даже слабых тектонических землетрясений, по сравнению с сильными ($M_S \geq 3.8$), в рассматриваемом регионе происходит не много и редко.

Возможно, в качестве “сейсмической разгрузки” в Уральском регионе выступает достаточно развитая горнодобывающая промышленность с буровзрывными работами, деятельность которой периодически “ослабляет” сейсмический потенциал геологической среды, не позволяя накопить достаточно энергии для более частой реализации землетрясений, по крайней мере, предположительно в приповерхностной части (на глубине до первых километров). А может быть, в каком-то случае буровзрывные работы, наоборот, выступают своеобразным “триггером”, способствующим возникновению тектонических событий. Кроме того, нельзя исключать и другие факторы, воздействующие на геологическую среду. Данный вопрос требует отдельного изучения и выходит за рамки данной статьи.

Сейсмическая активность

Для детального знания повторяемости землетрясений различных магнитуд на рассматриваемой территории строилась матрица сейсмической активности $A_{3,3}$, являющаяся аналогом сейсмической активности A_{10} [23, 24], которую вместе с матрицей M_{max} используют для расчета сейсмической сотрясаемости. В матрице сейсмической активности $A_{3,3}$ (магнитуда $M_S = 3.3$ соответствует землетрясениям с энергетическим классом $K=10$, тем самым сохраняется преемственность в оценках величины сейсмической активности к исследованиям прошлых лет, и обеспечивается сопоставимость полученных результатов) значения сейсмической активности отнесены к центрам узлов координатной сетки. Расчеты велись по территории (см. рис. 1), укладываемой в координаты $53.0-67.5^\circ$ с.ш., $45-78^\circ$ в.д. по сетке с размерами ячеек 5×5 км. Сейсмическую активность рассчитывают по формуле [23, 24]:

$$A_0 = (1 - 10^{-b}) / 10^{-b(M_{min} - M_0)} \cdot (T_0 S_0) / (TS) \cdot N_S, \quad (4)$$

где b — наклон графика повторяемости (в данном случае $b = 0.6446$, в соответствии с формулой (3)); $M_{min} = 2.5$ — наименьшая представительная магнитуда (уровень представительности);

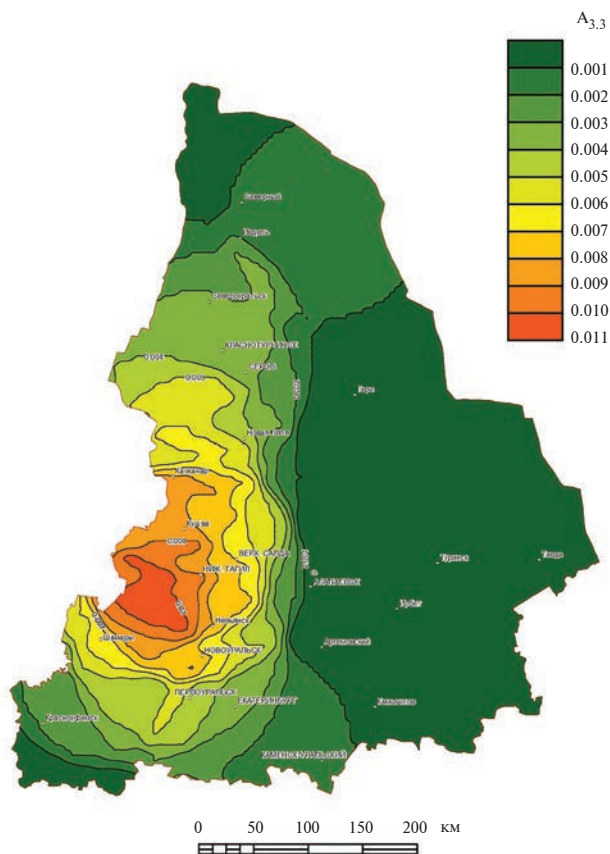


Рис. 3. Схема сейсмической активности $A_{3,3}$ территории Свердловской области.

$M_0 = 3.33$ — магнитуда землетрясений, которой соответствует рассчитываемая активность A_0 ; S_0 — принятая в соответствии с A_0 единица нормирования по площади (в данном случае $S_0 = 31415.93$ км², соответствующая радиусу осреднения $R = 100$ км), T_0 — единица времени (один год); S — площадь площадки осреднения; T — период представительного наблюдения землетрясений (лет); N_S — общее число землетрясений различных магнитуд $M \geq M_{min}$, наблюдаемых за время T на площади S .

В данной работе сейсмическая активность A_0 , по сути дела, является отражением среднего числа землетрясений с магнитудой M_0 в год на площади в 31415.93 км² или в радиусе 100 км от каждой точки расчета (рис. 3). Другими словами, можно сказать, что землетрясения с магнитудой $M = 3.33$ на площади в радиусе 100 км от каждой точки расчета, расположенных в пределах территории со значением изолинии 0.01 в среднем происходят 1 раз в 100 лет.

В целом, рассматриваемая территория является слабо дифференцированной по величине сейсмической активности ($A_{3,3}$), которая варьирует в диапазоне значений $0.001 \leq A_{3,3} \leq 0.011$. При этом наиболее высокие значения $A_{3,3}$ наблюдаются в западной части Свердловской обл. в пределах

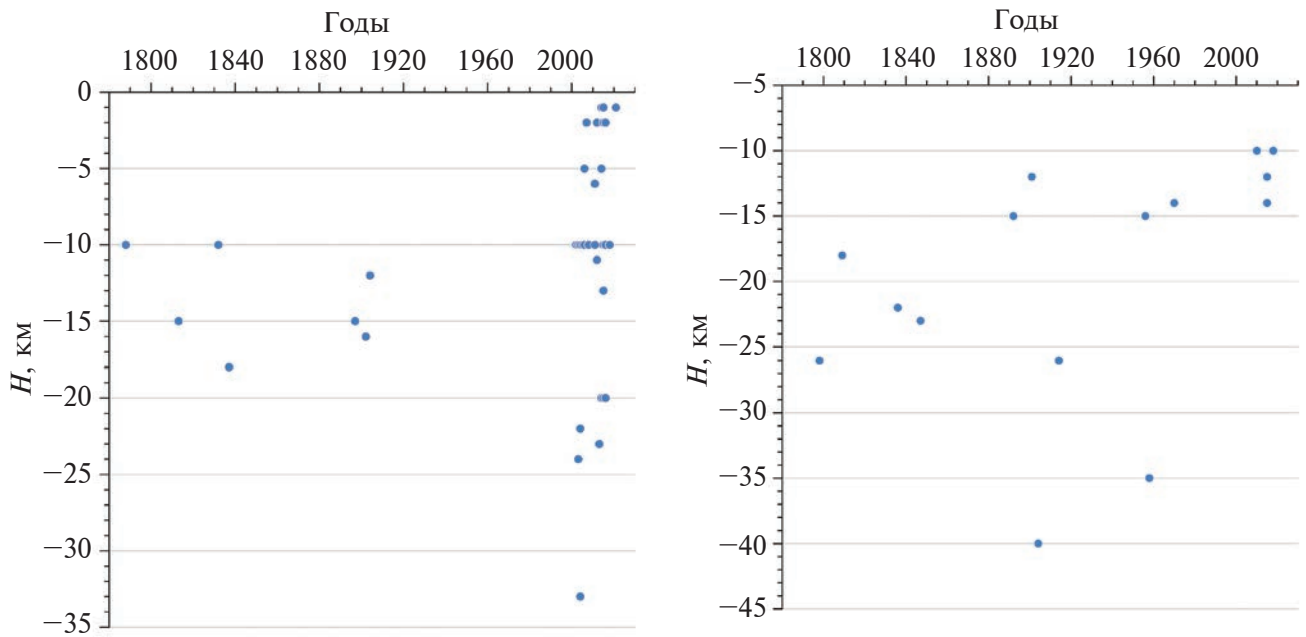


Рис. 4. Распределение гипоцентров слабых тектонических землетрясений: а — $1.5 \leq M_s \leq 3.7$, б — $3.8 \leq M_s \leq 5.3$, по глубине за период 1788–2022 гг. в пределах территории исследований.

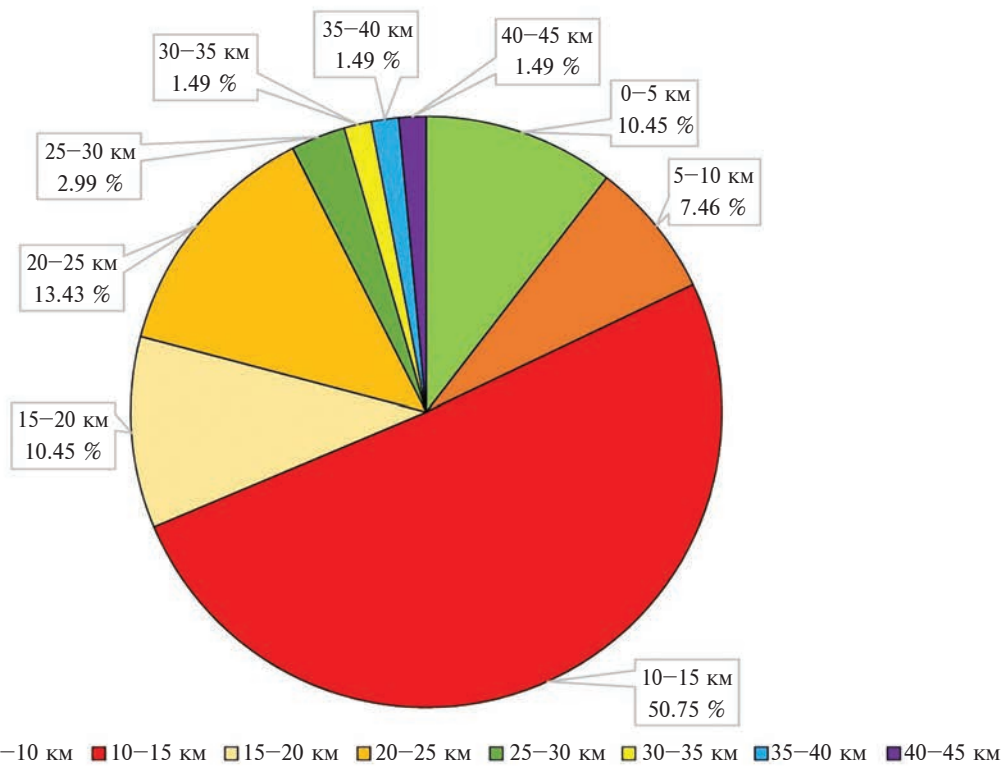


Рис. 5. Диаграмма распределения гипоцентров тектонических землетрясений по глубине за период 1788–2022 гг. в пределах территории исследований.

координат $57^{\circ}30' - 58^{\circ}$ с.ш., $58^{\circ}30' - 60^{\circ}$ в.д. Расчет сейсмической активности выполнялся по программе “seismicActivity”, реализованной на языке программирования C++ (автор: Д. Д. Бызов).

Распределение гипоцентров землетрясений по глубине

Распределение гипоцентров землетрясений по глубинам строится отдельно для сильных и умеренных [$M_S \geq 4.3$ (3.8)] и слабых [$M_S \leq 4.2$ (3.7)]. Рекомендуемый шаг распределения по глубине Δh равен 5 км [23].

Распределение гипоцентров землетрясений по глубине — важный элемент изучения сейсмического режима и позволяет судить о глубинах залегания сейсмоактивного слоя и его мощности на исследуемой территории. Эти сведения также необходимы для расчета сейсмической сотрясаемости. Представление о распределении сейсмичности по глубине в пределах всей исследуемой территории дают рис. 4, на которых отдельно представлены сведения о распределении по глубине гипоцентров слабых ($1.5 \leq M_S \leq 3.7$) и сильных и умеренных ($3.8 \leq M_S \leq 5.3$) землетрясений.

Из анализа рис. 4 в пределах территории расчета матрицы сейсмической активности $A_{3,3}$ можно выделить три основные группы, в которых гипоцентры тектонических землетрясений приурочены к интервалам глубин 0–5, 10–15 и 20–25 км. Кроме того, как можно заметить на рис. 5, наблюдается сейсмическая активность в интервале глубин 35–40 км. Сюда относятся землетрясения: 13.02.1904 г. ($M_S = 5.3$, $h = 40$ км, координаты эпицентра 56.5° с.ш., 73.6° в.д.), 13.09.1958 г. ($M_S = 3.9$, $h = 35$ км, координаты эпицентра 57.2° с.ш., 58.4° в.д.). В целом, очаги большей части ощутимых землетрясений территории исследования локализованы в интервале глубин 10–15 км (рис. 5). Этот глубинный сейсмоактивный интервал соответствует глубинам развития пород дорифейского кристаллического фундамента, что согласуется с расчетной 3D разломно-блоковой плотностной модели Урала и прилегающих территорий [10, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы впервые составлен сводный унифицированный каталог тектонических землетрясений исследуемой территории за период 1788–2022 гг., содержащий 156 событий магнитудой $M_S \leq 5.3$. На его основе, после исключения афтершоков, уточнения периодов представительной регистрации различных магнитуд построен график повторяемости тектонических событий. Положение графика ниже оси абсцисс указывает на слабую сейсмическую активность региона. Землетрясения с магнитудой $2.5 \leq M_S \leq 5.5$ происходили за период 1788–2022 гг. в среднем

с периодичностью менее 1 события в год. Полученный наклон графика повторяемости *b-value* равен 0.6446 ± 0.1093 .

Для детального знания повторяемости землетрясений различных магнитуд на рассматриваемой территории построена матрица сейсмической активности $A_{3,3}$. В целом, рассматриваемая территория слабо дифференцирована по величине сейсмической активности ($A_{3,3}$), которая варьирует в диапазоне значений $0.001 \leq A_{3,3} \leq 0.011$. При этом наиболее высокие значения $A_{3,3}$ наблюдаются в западной части Свердловской обл. в пределах координат $57^{\circ}30' - 58^{\circ}$ с.ш., $58^{\circ}30' - 60^{\circ}$ в.д. Фоновые значения сейсмической активности ($A_{3,3} = 0.001$) характерны для восточной части территории области, расположенной в пределах Западно-Сибирской плиты.

В пределах территории расчета матрицы сейсмической активности $A_{3,3}$ выделены три основные группы, в которых гипоцентры тектонических землетрясений приурочены к интервалам глубин 0–5, 10–15 и 20–25 км. В целом, очаги большей части ощутимых землетрясений территории исследования локализованы в интервале глубин 10–15 км.

Полученные данные являются частью работ по детальному сейсмическому районированию территории Свердловской обл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьин И. В.* Сейсмологические данные по регионам: XIV. Европейская часть СССР, Урал и Западная Сибирь // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.). М.: Наука, 1977. С. 465–470.
2. База данных “Землетрясения России”. [Электронный ресурс]. URL: <http://eqru.gsrns.ru> (дата обращения 12.05.2023).
3. *Блинова Т. С.* Прогноз геодинамически неустойчивых зон. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 162 с.
4. *Вейс-Ксенофонтова З. Г., Попов В. В.* К вопросу о сейсмической характеристике Урала // Тр. Сейсмологического института АН СССР. Вып. 104. М.: Изд-во АН СССР, 1940. 12 с.
5. *Верхоланцев Ф. Г., Габсатарова И. П., Гусева Н. С., Дягилев Р. А.* Среднеуральское землетрясение 18 октября 2015 г. $M_L=4.7$, $I_0=6$ баллов // Землетрясения Северной Евразии. 2021. Вып. 24 (2015 г.). С. 314–323. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.30>.
6. *Верхоланцев Ф. Г., Дягилев Р. А.* Качканарское землетрясение 29 марта 2010 г. Макросейсмические проявления // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. V Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С. 46–55.
7. *Годзиковская А. А.* Каталог сейсмических событий Уральского региона с древнейших времен по 2002 г. (Сопутствующие первичные материалы). М.: ИФЗ РАН, 2016. 258 с.

8. Гусева Н. С., Дягилев Р. А., Верхованцев Ф. Г. Макросейсмическое поле Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 г. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. XI Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 125–129.
9. Дружинин В. С., Колмогорова В. В., Парыгин Г. И. и др. Сейсмичность Урала // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Кн. 1. Землетрясения / Под ред. Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Шукина. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 263–276.
10. Дружинин В. С., Мартышко П. С., Начапкин Н. И., Осипов В. Ю. Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. 226 с.
11. Дягилев Р. А., Голубева И. В. Параметры Качканарского землетрясения 29 марта 2010 г. по инструментальным данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. V Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН. 2010. С. 89–93.
12. Дягилев Р. А., Гусева Н. С., Верхованцев Ф. Г. Анизотропия макросейсмического поля Среднеуральского землетрясения 18 октября 2015 года // Геофизика. 2016. № 5. С. 42–46.
13. Информация Службы срочных донесений // ФИЦ ЕГС РАН. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/new/ssd.htm> (дата обращения: 12.05.2023)
14. Кашубин С. Н., Дружинин В. С., Гуляев А. Н., и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 124 с.
15. Коломиец А. С., Петров С. И. Восточная часть Балтийского щита // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 141.
16. Кондорская Н. В., Горбунова И. В., Киреев И. А., Вандышева Н. В. О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений Северной Евразии по инструментальным данным (1901–1990 гг.) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН, 1993. С. 76.
17. Кусонский О. А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 280 с.
18. Лутиков А. И., Габсатарова И. П., Донцова Г. Ю. Об устойчивости параметров сейсмического режима во времени на примере востока центральной части Северного Кавказа // Российский сейсмический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 61–74.
19. Осипов В. Ю., Муравьев Л. А., Бызов Д. Д., Осипова А. Ю. Неоднородности верхов верхней мантии и кристаллической коры Урала и прилегающих территорий // Уральский геофизический вестник. 2022. № 2(48). С. 41–55. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.2.5.41>
20. Раутиан Т. Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР. М.: Наука, 1964. № 32 (199). С. 88–93.
21. Раутиан Т. Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. Глава 4. Труды ИФЗ АН СССР / Отв. ред. Ю. В. Ризниченко. М.: Изд-во АН СССР, 1960. № 9 (176). С. 75–113.
22. Ризниченко Ю. В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985, 408 с.
23. Свод правил СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. Минстрой России, 2016. 29 с.
24. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Отв. ред. Ю. В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 190 с.
25. Сейсмическое районирование территории СССР / Отв. ред. В. И. Бунэ, Г. П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с.
26. Сейсмологический мониторинг Западного Урала [Электронный ресурс]. URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tc&cat (дата обращения: 12.05.2023)
27. Степанов В. В., Годзиковская А. А., Ломакин В. С. и др. Землетрясения Урала и сильнейшие землетрясения прилегающих территорий Западной Сибири и Восточно-Европейской платформы. М.: ЦСГНЭО, 2002. 135 с.
28. Gutenberg, B., Richter, C. F. Frequency of Earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America., 1944. № 34. P. 185–188.

SEISMICITY AND SEISMIC MODE IN SVERDLOVSK REGION

A. Yu. Osipova^{a, #}, V. Yu. Osipov^a, D. D. Byzov^a

^a*Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Amundsen, 100, Yekaterinburg, 620016 Russia*

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

Sverdlovsk region is a major industrial center. There are mining enterprises, chemical plants, reservoirs, and high-capacity power plants. These objects are located close to large settlements. Currently, about 400 seismic events are recorded in the region annually. These are industrial explosions, rock bursts, rock tectonic events and tectonic earthquakes. Tectonic earthquakes are rare. For the period 1788–2022, about 30 tectonic earthquakes were recorded in Sverdlovsk region. The intensity of earthquakes at the epicenters was up to 5.0–6.0 on the MSK-64 scale. To ensure the seismic safety of objects of increased responsibility and especially important engineering structures, it is necessary to carry out

studies on detailed seismic zoning of the territory under consideration. The article presents the results of seismological studies. Consolidated unified catalogue of seismic events that occurred in the Urals region was compiled. Historical and instrumental catalogue data for the period 1788–2022 served as the basis. In this paper, a repeatability graph is presented. The graph position below the abscissa scale indicates weak seismic activity in the region. Earthquakes with a magnitude of $2.5 \leq M_S \leq 5.5$ occurred over the period 1788–2022 on average with a frequency of less than 1 event per year. The resulting slope of the *b*-value repeatability graph is 0.6446 ± 0.1093 . For a detailed knowledge of the repetition of earthquakes of various magnitudes in the area under consideration, a matrix of seismic activity $A_{3,3}$ was constructed. In general, the observed area is weakly differentiated in terms of seismic activity ($A_{3,3}$), which varies in the range of $0.001 \leq A_{3,3} \leq 0.011$. At the same time, the highest values of $A_{3,3}$ are observed in the western part of Sverdlovsk region within the coordinates $57^{\circ}30'–58^{\circ}$ N, $58^{\circ}30'–60^{\circ}$ E. The background values of seismic activity ($A_{3,3}=0.001$) are typical for the eastern part of the Sverdlovsk region, located within the West Siberian plate. In the study area, the sources of most of perceptible earthquakes are localized in the depth interval of 10–15 km, which corresponds to the depths of the pre-Riphean crystalline basement rocks.

Keywords: *earthquake catalogue, repeatability graph, seismic activity, seismic mode, magnitude*

REFERENCES

- Anan'in, I.V. [Seismological data by regions: XIV. European part of the USSR, Urals, and the Western Siberia]. In: [New catalog of strong earthquakes in the USSR territory (from the ancient times till 1975)]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 465–470. (in Russian)
- Database on the earthquakes in Russia. Online resource. URL: <http://eqr.gsr.ru> (accessed 12.05.2023). (in Russian)
- Blinova, T.S. [Forecast of geodynamically unstable zones]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2003, p. 162. (in Russian)
- Weis-Ksenofontova, Z.G., Popov, V.V. [About seismological characteristics of the Urals]. Proc. Seismological Institute USSR Academy of Sciences. Issue 104. Moscow, AN SSSR Publ., 1940, p. 12. (in Russian)
- Verkholantsev, F.G., Gabsatarova, I.P., Guseva, N.S., Dyagilev, R.A. [The MidUrals earthquake on October 18, 2015. $M_L=4.7$, $I_0=6$]. In: [The North Eurasian earthquakes]. Issue 24 (2015), 2021, pp. 314–323 <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.30>. (in Russian)
- Verkholantsev, F.G., Dyagilev, R.A. [The Kachkanar earthquake on March 29, 2010. Macro seismic manifestations]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. V Int. Seismological workshop. Obninsk, GS RAN Publ., 2010, pp. 46–55. (in Russian)
- Godzikovskaya, A.A. [Catalog of seismic events in the Urals region from the ancient times till 2002 (Related primary data)]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2016, 258 p. (in Russian)
- Guseva, N.S., Dyagilev, R.A., Verkholantsev, F.G. [Macro seismic field of the MidUrals earthquake on October 18, 2015]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. XI Int. Seismological workshop. Obninsk, GS RAN Publ., 2016, pp. 125–129. (in Russian)
- Druzhinin, V.S., Kolmogorova, V.V., Parygin, G.I., et al. [Seismicity of the Urals]. In: [Earthquakes and micro seismicity in the tasks of modern geodynamics of the East European platform. Book 1. Earthquakes]. N.V. Sharov, A.A. Malovichko, Yu.K. Shchukin, Eds. Petrozavodsk, KarNTs RAN Publ., 2007, pp. 263–276. (in Russian)
- Druzhinin, V. , Martyshko, P.S., Nachapkin, N.I., Osipov, V.Yu. [Structure of the upper lithosphere and oil and gas content in the Urals region bowels]. Yekaterinburg, IGF UrO RAN Publ., 2014, 226 p. (in Russian)
- Dyagilev, R.A., Golubeva, I.V. [The parameters of Kachkanar earthquakes on March 29, 2010 by instrumental data]. In: [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. V Int. Seismological workshop. Obninsk, GS RAN Publ., 2010, pp. 89–93. (in Russian)
- Dyagilev, R.A., Guseva, N.S., Verkholantsev, F.G. [Anisotropy of macro seismic field on the MidUrals earthquake on October 18, 2015]. *Geofizika*, 2016, no. 5, pp. 42–46. (in Russian)
- Early alert service information. Federal research center. Geophysical survey. Online resource. URL: <http://www.ceme.gsr.ru/new/ssd.htm> (accessed: 12.05.2023) (in Russian)
- Kashubin, S.N., Druzhinin, V.S., Gulyaev, A.N., et al. [Seismicity and seismic zoning of the Urals region]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2001, 124 p. (in Russian)
- Kolomiyets, A.S., Petrov, S.I. [The Eastern part of the Baltic shield]. In: [Earthquakes in the Northern Eurasia in 1995]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 2001, pp. 141. (in Russian)
- Kondorskaya, N.V., Gorbunova, I.V., Kireyev, I.A., Vandysheva, N.V. [About compilation of a unified catalog of strong earthquakes in the Northern Eurasia by instrumental data (1901–1990)]. In: [Seismicity and seismic zoning of the Northern Eurasia]. Issue 1., Moscow, IFZ RAN Publ., 1993, 76 p. (in Russian)
- Kusonskii, O.A. [Geophysical observation studies in the Urals]. Yekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 2012, 280 p. (in Russian)
- Lutikov, A.I., Gabsatarova, I.P., Dontsova, G.Yu. [About time stability of seismic regime parameters by the example of the eastern segment on the central part of the Northern Caucasus]. *Rossiiskii seismicheskii zhurnal*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 61–74. (in Russian)
- Osipov, V.Yu., Murav'ev, L.A., Byzov, D.D., Osipova, A.Yu. [Heterogeneity in the upper part of the upper mantle and the crystalline crust of the Urals and the adjacent territories]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*. 2022, no. 2(48), pp. 41–55. <https://doi.org/10.25698/UGV.2022.2.5.41> (in Russian)

20. Rautian, T.G. [About determination of the earthquake energy at a distance to 3000 km]. *Ekspertimental'naya seismika. Trudy IFZ AN SSSR*. 1964, no. 32 (199), pp. 88–93. (in Russian)
21. Rautian, T.G. [Energy of earthquakes]. *Metody detal'no-go izucheniya seismichnosti. Trudy IFZ AN SSSR*, 1960, no. 9 (176), pp. 75–113. (in Russian)
22. Riznichenko, Yu.V. [Selected works. Problems in seismology]. Moscow, Nauka, 1985, 408 p. (in Russian)
23. [Construction rules. SP 286.1325800.2016. Construction objects of high responsibility. Rules of detailed seismic zoning]. Minstroy Rossii, 2016, 29 p. (in Russian)
24. [Seismic shaking of the USSR territory]. Yu. V. Riznichenko, Ed. Moscow, Nauka Publ., 1979, 190 p. (in Russian)
25. [Seismic zoning of the USSR territory]. V.I. Bune, G.P. Gorshkov, Eds. Moscow, Nauka Publ., 1980, 308 p. (in Russian)
26. [Seismologic monitoring of the Western Urals]. Online resource. URL: http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=727&php=tc&at (accessed 12.05.2023) (in Russian)
27. Stepanov, V.V., Godzikovskaya, A.A., Lomakin, V.S., et al. [The Urals earthquakes and the strongest earthquakes in the adjacent territories of the Western Siberia and the East European platform]. Moscow, TsSGNEO Publ., 2002, 135 p. (in Russian)
28. Gutenberg, B., Richter, C.F. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1944, no. 34, pp. 185–188.

РАЙОНИРОВАНИЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ Г. УФЫ ПО УСЛОВИЯМ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

© 2024 г. Д. Р. Епифанова^{1, 2, *}, А. И. Травкин^{3, **}, О. К. Криночкина¹

¹ООО “РН-БашНИПИнефть”, ул. Ленина, 86/1, Уфа, 450006 Россия

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337 Россия

³Научно-производственное предприятие “Сингеос” (НПП “Сингеос”), ул. Ольховская, 45, корп. 1, Москва, 129323 Россия

*E-mail: oms@mgsu.ru

**E-mail: anatoly_tra@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 16.11.2023 г.

Принята к публикации 11.01.2024 г.

В статье на конкретном примере рассматриваются инженерно-геологические условия территории (исследуемый участок, площадь), расположенной в северо-восточной селитебной части г. Уфы. Здесь широко развиты инженерно-геологические процессы (ИГП), в том числе экзогенные опасные геологические процессы (ОГП) и их проявления: карстовые и суффозионные (провалы, воронки), склоновые и эрозионные (оползни, овраги, промоины), затопление речными водами и др. Инженерно-геологическая изученность территории г. Уфы в среднем достаточно высокая, но неравномерна по площади исследования, что справедливо и для исследуемого участка, треть территории которого застроена и изучена детально, на остальной же его части инженерно-геологические изыскания для капитального строительства не велись, а для характеристики его инженерно-геологических условий были использованы фондовые геологические и инженерно-геологические материалы, привлечены методы инженерно-геологических аналогий, маршрутного обследования территории, дешифрирование аэро- и космоснимков. Результатом этих работ явилась схематическая карта в масштабе 1:10000 инженерно-геологического районирования территории по условиям развития ОГП.

Ключевые слова: опасные геологические процессы, районирование, участок, строительство, карст, суффозия, овраг

DOI: 10.31857/S0869780924010063, EDN: GNVWWM

Цель работы — показать на примере выбранной площади, характеризующейся развитием опасных геологических процессов (ОГП), возможность инженерно-геологического районирования территории для градостроительного зонирования и предварительного размещения проектируемых зданий и сооружений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой исследований послужили материалы отчета по теме “Создание цифровой карты инженерно-геологического районирования в масштабе 1:10000 для разработки Генерального плана Городского округа города Уфы Республики Башкортостан” (авторы: А. И. Травкин, Д. Р. Байбикова (ныне Д. Р. Епифанова), С. А. Алтынбаев).

Карта инженерно-геологического районирования (ИГР) г. Уфы в масштабе 1:10000 составлена

на основе предварительно построенных вспомогательных карт: геоморфологической, геолого-литологической (совмещенной с картой четвертичных отложений и специфических грунтов), гидрогеологической и гидрологической (с вынесенными границами затопления), проявлений ОГП.

Материалы ИГР, использованные для составления карт, были занесены в электронный банк данных: 3078 отчетов об инженерно-геологических изысканиях за 1994–2013 гг., 22817 скважин (скв.). Дополнительно пройдено 27 инженерно-геологических рекогносцировочных маршрутов суммарной протяженностью 141.3 км, дешифрировано 80 аэро- и космоснимков. Степень инженерно-геологической изученности территории достаточно высокая, но остается неравномерной по площади. Последнее выражается в том, что количество выработок на 1 км² по планшетам колеблется в среднем от 2 до 283 (при норме 16 т.н./км² для III категории

сложности инженерно-геологических условий (табл. 6.1, СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП II-02–96. М.: Госстрой России, 2013. 90 с.).

Архивный фактический материал в виде документации горных выработок, данных геофизических, гидрогеологических, гидрологических и лабораторных исследований, использованный для построения карт города, получен в процессе многолетних инженерно-геологических изысканий. При создании цифровой карты ИГР М 1:10000 территории г. Уфы (2013 г.) полевые работы программой не предусматривались, за исключением рекогносцировочного обследования местности, благодаря чему отчасти были восполнены пробелы в изученности территории. Тем не менее, построенные вспомогательные и итоговая карты являются *схематическими*.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно структурно-геоморфологической схеме (рис. 1), в пределах исследуемой территории выделяются две положительные структуры южного окончания Черкассинского блока: Уфимско-Шугуровский вал, называемый Курочкиной горой, и Бельско-Шугуровский вал, разделенные долиной р. Шугуровка. С восточной стороны к Уфимско-Шугуровскому валу примыкает долина р. Уфа.

В геоморфологическом отношении большая часть (~75%) исследуемой территории занята террасированными долинами рек Шугуровка и Уфа (см. рис. 1).

Долина р. Шугуровка представлена нерасчлененными I и II надпойменными террасами с абсолютными отметками дневной поверхности по южной границе участка от 98 до 114 м БС, а по северной — от 114 до 129 м БС (здесь и далее минимальная и максимальная абсолютные отметки дневной поверхности геоморфологических элементов приводятся в Балтийской системе высот (абс. отм. БС)).

Долина р. Уфа представлена эродированной поверхностью I надпойменной террасы и высокой поймой. На остальной четверти территории расположены:

а) Уфа-Шугуровский вал с максимальными высотами 171 и 199 м абс. отм. БС, на южном окончании и на северной границе участка, соответственно,

б) восточное окончание Бельско-Шугуровского вала с минимальной и максимальной высотами: 129 и 137 м абс. отм. БС,

в) русло р. Шугуровка (98–108 м абс. отм. БС).

Геолого-литологическое строение является основой, определяющей развитие ОГП

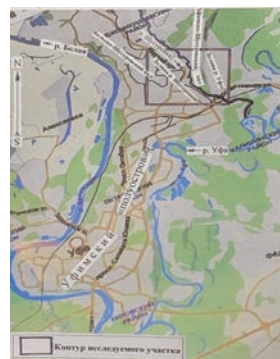


Рис. 1. Контур исследуемого участка, вынесенный на структурно-геоморфологическую схему г. Уфа 1:100000 масштаба [1].

определённого вида, присущих только существующему набору горных пород исследуемой территории.

В региональном плане исследуемая территория сложена мощным (до 8 км) комплексом осадочных пород верхнего протерозоя, палеозоя и кайнозоя, основанием которого служит метаморфическая толща кристаллического фундамента нижнего протерозоя. Последняя осложнена субмеридиональными и субширотными разломами, с которыми сопряжены ослабленные зоны. Чаще всего в пределах этих зон и развивается большая часть проявлений ОГП [1, 3].

В практике инженерно-геологических изысканий в пределах Уфы изучается толща горных пород до глубины 60–80 м, реже — до 100 м, внедряясь в карстующиеся гипсы и ангидриты кунгурского яруса нижнепермской системы (P_{1k}) на 10 и более метров.

Более молодыми являются отложения уфимского яруса, залегающие согласно на кунгурских породах той же системы (P_{1u}): глины, алевролиты, песчаники и карстующиеся известняки, доломиты, мергели, мергелистые глины и загипсованные песчаники.

На пермских породах со стратиграфическим несогласием залегают неоген-четвертичные (общесыртовые $N_2^3-Q_1$) глины и суглинки с включением щебня известняка от 10 до 40%.

Возвышенные места (Уфимско-Шугуровский и Бельско-Шугуровский валы) сложены породами нижнепермской системы (P_1), почти везде прикрытыми лишь тонким слоем элювиально-делювиальных четвертичных отложений (edQ) и почвенно-растительным слоем (pQ_{IV}). Только у юго-восточного окончания Уфимско-Шугуровского вала гипсы кунгурского яруса выходят на дневную поверхность.

В долинах рек на пермских породах залегают неоген-четвертичные глины и четвертичные

аллювиальные, аллювиально-делювиальные суглинки и песчано-глинистые отложения.

Гидрогеологические условия участка до глубины регионального водоупора (гипсы и ангидриты монолитные) характеризуются развитием: а) водоносных горизонтов в четвертичных, неоген-четвертичных и кунгурских отложениях, б) водоносного комплекса в отложениях уфимского яруса.

Согласно гидродинамической классификации [1], вертикальный разрез осадочного чехла относится к зоне интенсивного водообмена, где породы находятся в сфере дренирующего влияния местной гидрографической сети: в большей степени — рек Уфа и Шугуровка, в меньшей — р. Белая. Мощность зоны интенсивного водообмена изменяется от 20–50 м под днищем долин Белой и Уфы, на водораздельных пространствах она увеличивается до 100–120 м при расположении кровли монолитных гипсов кунгурского яруса на одном уровне.

Питание подземных вод осуществляется за счет атмосферных осадков, перетоков из вышерасположенных горизонтов и подтока из-за границ территории, утечек из водонесущих коммуникаций (на застроенной территории участка); разгрузка — через выходы родников на дневной поверхности, перетоках в гипсометрически нижерасположенные отложения и в гидрогеологические “окна”. В верхней части зоны интенсивного водообмена подземные воды безнапорные, в нижней части — воды обладают напором.

Для верхней части зоны интенсивного водообмена характерны гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-сульфатные, гидрокарбонатно-хлоридные, хлоридно-гидрокарбонатные с минерализацией 0.2–1.6 г/л, для нижней части зоны — сульфатные магниевые-кальциевые воды с минерализацией 1.9–4.0 г/л. Дефицит насыщения карстовых вод сульфатом кальция в уфимских и кунгурских отложениях достигает в среднем 2.0 г/л, а карбонатом — сотых долей г/л.

Экзогенные опасные геологические процессы. В пределах выбранной площади широко развиты проявления карстовых, карстово-суффозионных, эрозионных и склоновых процессов, выраженные в рельефе провалами, воронками, эрозионными формами и др. (далее: карст, карстопоявления, оползни, овраги).

Карстово-суффозионные процессы. Поскольку химически чистые карстующиеся сульфатные и карбонатные породы в природе практически не встречаются, то с карстовыми процессами обычно связаны процессы суффозии, образуя карстово-суффозионные явления, когда растворенная часть породы вместе с нерастворимыми частицами выносятся движущимися водами.

Что же касается непосредственно карста, то на исследуемой территории имеются все 4 условия

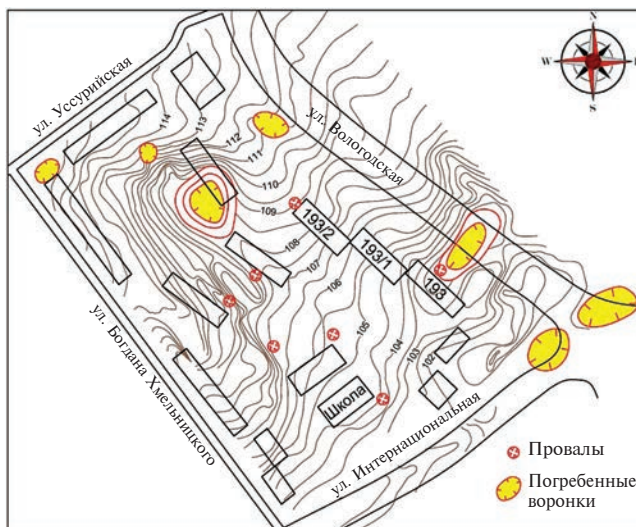


Рис. 2. Схема распространения карстопоявлений на исследуемом участке в квартале улиц Вологодской, Интернациональной, Богдана Хмельницкого, Уссурийской г. Уфа [3].



Рис. 3. Фото карстового провала на придомовой территории д. 193 по ул. Интернациональной. Автор Мулюков Э.И.

(по Д. С. Соколову [4]) для развития карстового процесса: растворимые породы, их водопроницаемость, движущиеся воды и их растворяющая способность.

Непосредственно на дневной поверхности исследуемого участка (рис. 2, 3) показаны проявления карстово-суффозионного, карстово-эрозионного и эрозионного процессов в виде: полей и одиночных воронок, а также оврагов.

На рис. 2 представлена часть рассматриваемой территории — городской квартал со схемой карстопоявлений, где за последние 30–40 лет зафиксировано 7 карстовых и карстово-суффозионных провалов различных размеров и морфологии, в том числе провал 1984 г., представленный на фото (рис. 3). Следует отметить, что в 70% случаев карстовые провалы связаны с сульфатными породами.

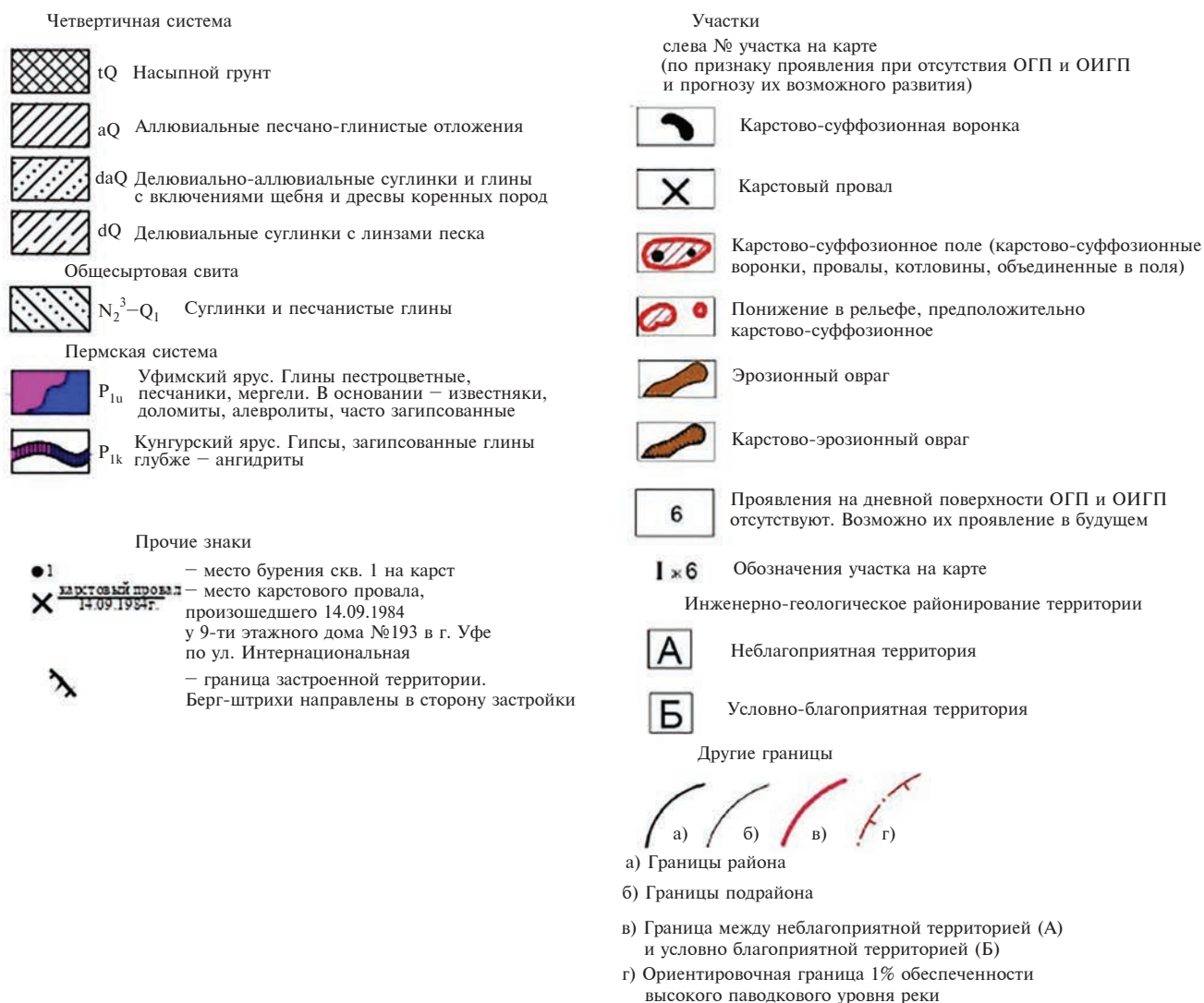
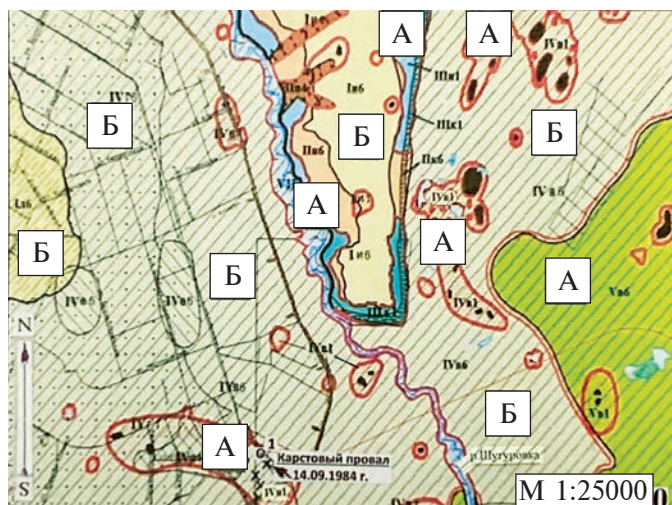


Рис. 4. Схематическая карта районирования по условиям развития опасных геологических процессов в северо-восточной части г. Уфы и условные обозначения к ней.

Жилые 9-этажные дома №№ 193, 193/1 и 193/2 (см. рис. 2) построены в 1972 г., а 5-этажные (№№ 187/1 и 187/2) — в 1968 г. В то время карт распространения проявлений ОГП на территории города не было, также не существовало нормативных документов по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территории для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах. Рекомендации по этой теме для территории СССР были изданы ПНИИСом в 1967 г., но изыскателями применяться они стали не сразу. Да и достаточного опыта изысканий в карстовых районах на то время наработано не было. Все площадки под указанные дома были признаны пригодными, без каких-либо ограничений и рекомендаций. Техногенное вмешательство в столь неблагоприятную геологическую среду городской территории без серьезных противокарстовых мероприятий не заставило долго ждать с “ответом” [6].

Карстово-эрозионный и эрозионный процессы подразделяются на склоновые, овражные и речные. Склоновым процессам на участке подвержен Уфимско-Шугуровский вал, и проявляются они в виде плоскостного и сосредоточенного смыва поверхностных рыхлых отложений потоками атмосферных осадков, образуя при этом промоины, борозды, неглубокие овраги.

Следствием эрозионного и карстово-эрозионного процессов являются два оврага на

северо-западном склоне Уфимско-Шугуровского вала: ближний к северной границе — эрозионный овраг, южнее — карстово-эрозионный.

Речной эрозии подвержены берега р. Шугуровка, протекающей по участку в субмеридианальном направлении [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом исследования стали: а) карта районирования участка по условиям развития и проявлениям опасных геологических процессов (рис. 4), б) рекомендации по строительному освоению участка.

Инженерно-геологическое районирование территории г. Уфы по условиям развития ОГП основано на выделении трех таксонов, характеристика которых приведена в табл. 1.

Иерархия таксонов районирования исследуемой территории следующая:

- *районы* выделены (всего 6 районов) по геоморфологическим условиям территории: I, II, III, IV, V, VII;
- *подрайоны* ранжируются по геолого-генетическим комплексам и обозначаются на карте строчными буквами русского алфавита: а, в, г, д, е, ж, и, к;
- *участки* (всего 4 участка) обозначаются на карте арабскими цифрами: 1, 3, 4, 6.

На схематической карте районирования исследуемой территории по условиям развития опасных

Таблица 1. Характеристика таксонов районирования по ОГП территории г. Уфа

Районы	Подрайоны	Участки
I — Водораздельное плато. Уклон дневной поверхности (уклон д.п. до 8°). Выработанные денудационные поверхности; полигенетические поверхности лиманно-морской равнины; останцовая поверхность высоких водоразделов. Рельеф слабо расчлененный. Подземные воды ожидаются на глубинах 4–7 м и глубже. Возможно поднятие уровня подземных вод (УПВ) на отдельных участках до глубины 2 м	а — tQ _{IV} . Техногенно-насыпные образования голоцена б — IQ _{IV, III} . Биогенные и озерно-старичные образования четвертичной системы в-аQ _{IV, III} . Аллювиальные отложения четвертичной системы	1 — проявления карстового процесса (воронки, провалы, понижения, пещеры)
II — Склоны долины средней крутизны (уклон д.п. 8–15°). Денудационные поверхности; останцовая поверхность водоразделов. Рельеф слабо расчлененный. Подземные воды ожидаются на глубинах 4–7 м и глубже. Возможно поднятие УПВ на отдельных участках до глубины 2 м	г — daQ. Делювиально-аллювиальные четвертичные отложения д — dQ. Делювиальные четвертичные отложения е — N ₂ ³ -Q ₁ . Глинистые верхнеплиоценово-нижнеплейстоценовые отложения ж — N ₂ . Глинистые отложения верхне-неогеновой системы и — P _{1u} . Отложения уфимского яруса нижнепермского отдела к — P _{1k} . Отложения кунгурского яруса нижнепермского отдела	3 — эрозионные овраги 4 — карстово-эрозионные овраги 6 — отсутствие проявлений опасных геологических процессов
III — Склоны долин: крутые (уклон д.п. > 15°). Склоны неустойчивые относительно оползневой опасности. Подземные воды ожидаются в основном глубже 7 м		
IV — нерасчлененные I, II надпойменные террасы. Абс. отм. рельефа: I НПТ — 90–110 м, II НПТ: 110–122 м. Подземные воды ожидаются на глубинах от 2–4 до 4–7 м и глубже		
V — I надпойменная терраса и высокая пойма, периодически затапливаемые водами высоких паводков рек		
VII — русла больших рек; русла и поймы малых рек и ручьев, периодически затапливаемые паводковыми водами больших рек		

Таблица 2. Рекомендации по строительному освоению исследованной территории в северо-восточной части г. Уфа

Обозначение участка карте (индекс)	Возраст геолого-генетических комплексов	Характеристика проявлений опасных геологических процессов (ОГП) и прогноз их развития	Степень благоприятности для строительного освоения	
			А	Б
Ии1	P _{1u}	Карстово-суффозионные провалы, воронки, часто объединенные в поля. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
Ии3		Овраг эрозионный		
Ии4		Овраг карстово-эрозионный		
Ииб		Отсутствие проявлений ОГП на дневной поверхности, но возможны проявления в будущем. III, IV, V категории устойчивости территории		Б
Пи4	P _{1u}	Овраги карстово-эрозионные	А	
Пи6		Отсутствие проявлений ОГП на дневной поверхности. III, IV, V категории устойчивости территории ОИОКП		Б
Ши1	P _{1u}	Карстово-суффозионные провалы, воронки, часто объединенные в поля. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
Шк1	P _{1kg.}	Поверхностные карстовые микроформы: каверны. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
IVa1	tQ _{IV} Грунты насыпные	Карстово-суффозионные провалы, воронки, часто объединенные в поля. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
IVb1	aQ _{IV, III da, pQ N₂³-Q₁}	Карстово-суффозионные провалы, воронки, часто объединенные в поля. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
IVb6		Отсутствие проявлений ОГП на дневной поверхности. III, IV, V категории устойчивости территории ОИОКП		Б
IVг1		Карстово-суффозионные провалы, воронки, котловины, часто объединенные в поля. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
IVe6		Отсутствие проявлений ОГП на дневной поверхности. IV, V категории устойчивости территории ОИОКП	А	
IVг6	aQ _{I, II}	Отсутствие проявлений ОГП на дневной поверхности. Возможны их проявления, в том числе карстово-суффозионных процессов и склоновых, на уступах террас в будущем. III, IV, V категории устойчивости территории ОИОКП		Б
Vb1	aQ _I	Карстово-суффозионные провалы, воронки, часто объединенные в поля. I, II категории устойчивости территории ОИОКП	А	
Vb6		Отсутствие проявлений ОГП на дневной поверхности. Возможны их проявления, в том числе карстово-суффозионных процессов и склоновых, на уступах террас в будущем. III, IV, V категории устойчивости территории ОИОКП		
VШb6	aQ _{IV}	Отсутствие проявлений ОГП. Возможны их проявления, в том числе карстово-суффозионных и эрозионных (донная и боковая эрозия) процессов, в будущем. III, IV, V категории устойчивости территории ОИОКП		Б

Примечание. *Категория устойчивости территории относительно интенсивности образования карстовых провалов (ОИОКП) приведена по табл. 5.1 СП 11-105–97, ч. II.

ВЫВОДЫ

геологических процессов каждый участок обозначается трехзначным индексом, обозначающим: район, подрайон, участок. Сами участки относятся к той или иной степени их благоприятности для строительства.

Выделены два вида территорий: А — *неблагоприятная*, и Б — *условно благоприятная*, для строительства зданий и сооружений (табл. 2). На территории А строительство возможно *только с мерами инженерной защиты* от проявлений ОГП (профилактическим, конструктивным и укреплением грунтового основания). Последние выбираются после проведения инженерных изысканий на более детальных стадиях проектирования.

На территории Б строительство возможно с мерами инженерной защиты в зависимости от вида ОГП и их проявлений.

Благоприятные территории для капитального строительства отсутствуют [6].

Рекомендации по строительному освоению участков

А — неблагоприятная территория (по проявлениям ОГП):

— требуется принятие мер по инженерной защите в зависимости от вида проявившихся ОГП (противокарстовые, противооползневые, противоэрозионные);

— в соответствии с справочным приложением Е СП 116.13330.2012, рекомендуемый характер застройки и противокарстовых мероприятий (для категорий Б и В по среднему диаметру провалов согласно СП 11-105-97, табл. 5.2) следующий:

— для территории I категории устойчивости (очень неустойчивой), к которой относятся площади “свежих” карстово-суффозионных провалов, строительство зданий и сооружений не рекомендуется;

— для территории II категории устойчивости (неустойчивой), к которой относятся площади “древних” карстово-суффозионных воронок, строительство зданий и сооружений I и II уровней ответственности не рекомендуется;

— на более детальных стадиях проектирования выполняются инженерные изыскания в соответствии с действующими нормативными документами.

Б — условно благоприятная территория (по проявлениям ОГП):

— строительство возможно без ограничений; меры по инженерной защите, конструктивным и профилактическим мероприятиям назначаются после выполнения инженерных изысканий на более детальных стадиях проектирования в зависимости от вида возможных проявлений ОГП;

— на более детальных стадиях проектирования выполняются инженерные изыскания в соответствии с действующими нормативными документами.

В крупном масштабе Выполнены научно-практические исследования сложного в инженерно-геологическом отношении участка, расположенного в северо-восточной селитебной части г. Уфа. Особенностью его инженерно-геологических условий является развитие ОГП (карстовых, склоновых, суффозионных, эрозионных, затопления и их различных сочетаний). Знание этих особенностей имеет существенное значение при генеральном планировании строительных объектов в границах исследованной территории.

С учетом развития проявлений ОГП предложены рекомендации по строительному освоению территории в северо-восточной части г. Уфа, что позволит:

- сократить на предпроектном этапе затраты на реализацию проекта генплана,
- наметить размещение проектируемых зданий и сооружений,
- запроектировать необходимые и достаточные виды и объемы работ при инженерно-геологических изысканиях на более детальных стадиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов Р. Ф., Мартин В. И., Попов В. Г., Рождественский А. П., Смирнов А. И., Травкин А. И. Карст Башкортостана. Уфа: Изд-во Информреклама, 2002. 384 с.
2. Епифанова Д. Р., Травкин А. И. Опасные геологические процессы на территории проектируемой застройки в пределах юго-западной части г. Уфы: матер. шестнадцатой общерос. научно-практ. конф. “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2021. С. 739–746.
3. Камалов В. Г., Барышников В. И. Опасные геологические процессы на территории Уфимского “полуострова” (Инженерная геодинамика). Уфа: Информ, 2019. 240 с.
4. Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
5. Травкин А. И. Использование архивной геологической информации для решения градостроительных задач (на примере городского округа город Уфа Республики Башкортостан) // Матер. XI общерос. конф. “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. М.: Академическая наука. ООО “Геомаркетинг”. 2015. С. 24–26.
6. Травкин А. И. Прогноз карстоопасности и районирования закарстованных территорий (на примере центральной части г. Уфы): автореферат дис. ...канд.г.-м.н. М.: ПНИИС, 1989. 20 с.

ZONING OF THE NORTH-EASTERN PART OF UFA ACCORDING TO THE DEVELOPMENT OF HAZARDOUS GEOLOGICAL PROCESSES

D. R. Epifanova^{a, b, #}, A. I. Travkin^{c, ##}, O. K. Krinochkina^b

^a*RN-BashNIPIneft LLC, ul. Lenina 86/1, Ufa, 450006 Russia* National Research Moscow State

^b*University of Civil Engineering, Yaroslavskoe shosse 26, Moscow, 129337 Russia*

^c*Singeos Research and Production Enterprise, Ol'khovskaya ul. 45, Moscow, 129323 Russia*

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

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

The article is focused on consideration of the engineering geological conditions of the area situated in the north-eastern residential part of the Ufa city (the capital of Bashkortostan). The majority of urban population lives in the Ufa-Belsko-Shugurovsky interfluvial area. Exogenous hazardous geological processes are extensively developed there. The most wide-spread are karst, karst-suffusion, slope and erosion, as well as other engineering geological processes, which are manifested in the relief by sinkholes, craters, landslides, ravines and washouts. The research was based on a set of schematic maps compiled in 2013 according to archive data for the development of the Ufa master plan on a scale of 1:10000, as well as the updated versions of these maps [3]. The maps were created considering the state of the most problematic areas of geohazard activation. The occurrence of these processes was previously investigated by satellite and aerial images, and also in field by route survey as a part of reconnaissance. Archival geological information from the mining documentation was also used when compiling the maps. Engineering geological research and zoning territories with manifestation of karst, karst-suffusion, slope and other hazardous geological processes is proved to be relevant for the design of buildings and engineering structures. Currently, the engineering geological background data on the Ufa city territory is quite plentiful, and yet it remains uneven in the study area.

Key words: *engineering geological processes, zoning, site, building, karst, suffusion, gully*

REFERENCES

1. Abdrakhmanov, R.F., Martin, V.I., Popov, V.G. et al. [Karst in Bashkortostan], Ufa, Informreklama Publ., 2002, 384 p. (in Russian)
2. Epifanova, D.R., Travkin, A.I. [Hazardous geological processes in the area of projected urban development within the southwestern part of Ufa]. Proc. 16th All-Russian scientific and practical conference "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation". Moscow, 2021, pp. 739–746. (in Russian)
3. Kamalov, V.G., Baryshnikov, V.I. [Hazardous geological processes in the territory of Ufa "Peninsula" (Engineering geodynamics)]. Ufa, Informreklama Publ., 2019, 240 p. (in Russian)
4. Sokolov, D.S. [Principal conditions for karst development]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962, 322 p.
5. Travkin, A.I. [Use of archival geological information for resolving urban planning problems (by the example of the Ufa city district in the Republic of Bashkortostan)]. Proc. 11th All-Russian conference of survey organizations. Prospects for the development of engineering survey in construction in the Russian Federation. Moscow, Geomarketing Publ., 2015, pp. 24–26. (in Russian)
6. Travkin, A.I. [Forecast of karst hazard and zoning of karst areas (on the example of the central part of Ufa)]. Extended abstract of Cand. Sci (Geol.-Min.) diss. PNIIS Publ., Moscow, 1989, 20 p. (in Russian)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 556.551(470.11)

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОДОСБОРНОГО
БАСЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА

© 2024 г. Е. В. Полякова¹*, Ю. Г. Кутинов¹, З. Б. Чистова¹, А. Л. Минеев¹

¹ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова
УрО РАН, пр. Никольский, 20, Архангельск, 163020 Россия

*E-mail: lenpo26@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 28.09.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

В статье авторами рассмотрена восточная часть водосборного бассейна Белого моря в административных границах Архангельской области. Цель исследования — оценка потенциальной предрасположенности основных рек Архангельской обл. к сносу и накоплению осадочного материала (в том числе и загрязненного) на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа. Анализ источников загрязнения на глобальном (Европейский центр дестабилизации окружающей среды), региональном (Кольский промышленный узел) и локальном уровнях (предприятия Архангельской обл.) показал, что регион является реципиентом загрязнения. Основной путь переноса загрязняющих веществ — атмосферный, который в дальнейшем трансформируется в перенос водотоками во время паводков. На локальном уровне перенос осуществляется за счет стока вод. Во всех вышеперечисленных вариантах характер рельефа играет доминирующую роль в перераспределении загрязнения. Каждый из вышеперечисленных видов переноса может быть учтен и оценен при расчете геоморфометрических параметров рельефа, которые количественно демонстрируют потенциальную предрасположенность территории к сносу, транзиту и накоплению осадочного материала. Показана высокая роль бессточных впадин как приемников и накопителей загрязнения при расчете стока в поверхностные и подземные воды и переносе материала, как в ионной, так и во взвешенной форме. На основе расчета топографического индекса влажности (TWI), индекса расчлененности рельефа (TRI), индекса потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор) сделан вывод, что в бассейнах крупных рек Архангельской обл.: Северная Двина и Пинега, преобладают процессы смыва и транзита, и, как следствие, переноса загрязняющих веществ. А в бассейнах рек Онега и Мезень — преимущественны процессы аккумуляции осадочного материала.

Ключевые слова: водосборные бассейны рек, водосборная площадь, цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, Архангельская область

DOI: 10.31857/S0869780924010078, EDN: GNTQQA

ВВЕДЕНИЕ

Реакция геологической среды на природные или антропогенные воздействия во многом зависит от характера рельефа местности, который является своего рода “перераспределителем” эндогенных и экзогенных материальных потоков на земной поверхности. Не являются исключением и водные потоки, которые, воздействуя на земную поверхность, производят вначале разрушение и смыв почв и горных пород, затем перемещение разрыхленного материала вниз по течению водотока или наклона склона (при плоскостном смыве) и, наконец, отложение — аккумуляцию (или многократное переотложение) сносимого материала на относительно более низких уровнях (базисе эрозии). В состав сносимого материала входят не только природные, но и антропогенные образования,

как в ионной, так и во взвешенной форме. Поэтому в геоморфометрическом анализе местности широко используются такие базовые гидрологические параметры как площадь водосбора и объем поверхностного стока, позволяющие проводить оценку и моделирование процессов эрозии и аккумуляции переносимого материала, в том числе и загрязняющих веществ.

В статье авторами рассмотрена восточная часть водосборного бассейна Белого моря в административных границах Архангельской области. Выбор объекта исследований объяснялся следующими соображениями:

1. Общая площадь водосборного бассейна Белого моря составляет 717.7 тыс. км², из них административно Архангельской обл. принадлежат 302.1 тыс. км² (41.9%), республикам Коми

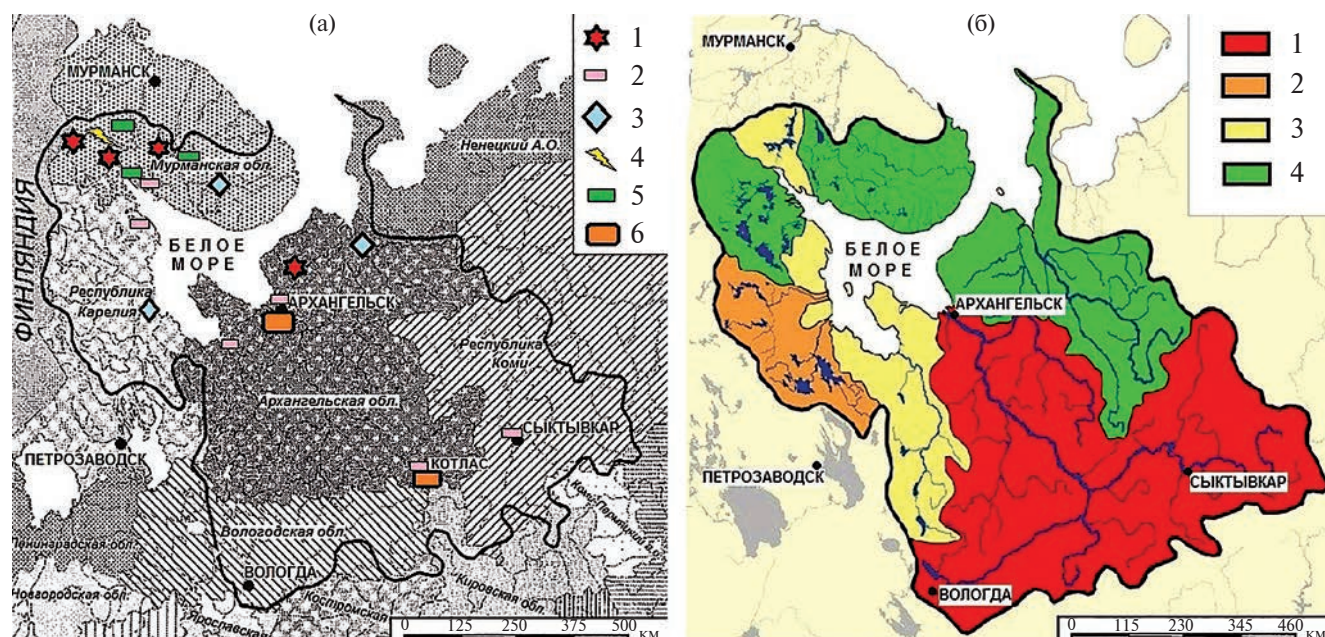


Рис. 1. Схема водосборного бассейна Белого моря: а — с субъектами РФ и источниками загрязнения по [20]: 1–6 — антропогенные объекты воздействия в пределах бассейна: 1 — горно-обогатительные и горно-добывающие; 2 — целлюлозно-бумажные; 3 — транспортные; 4 — энергетические; 5 — горно-металлургические; 6 — комплексного воздействия; б — районирование бассейна по степени негативного воздействия речного стока на качество морских вод по [1]: 1–4 — воздействие: 1 — недопустимое, 2 — допустимое, 3 — слабое, 4 — незначительное.

и Карелия — 142.7 тыс. км² (19.8%) и 89.2 тыс. км² (12.4%), Мурманской и Вологодской областям — 78.4 тыс. км² (10.9%) и 78.3 тыс. км² (10.9%), соответственно, а также небольшие площади Кировской и Костромской областям, Пермскому краю, Ненецкому автономному округу и Финляндии [20]. То есть наибольшая часть водосборного бассейна Белого моря приурочена к территории Архангельской обл. (рис. 1а).

2. Речные сети западной (Кольско-Карельской) и восточной (Архангельской) частей бассейна резко отличаются друг от друга. В западной части реки небольшие со слабо развитыми долинами и относятся к озерно-речным системам. Реки восточной части водосбора крупные, имеют хорошо развитые речные долины с большими площадями поверхностных водосборных бассейнов и высокими величинами твердого стока. Так, эти значения для основных рек в среднем составляют: Мезень — 320, Онега — 315, Северная Двина — 3200 тыс. т/год [18]. Кроме того, для восточной части характерны высокие средние значения модуля выноса химических элементов подземными водами — 18 т/год·км², в отличие от западной — 1.7 т/год·км² [3]. Это, скорее всего, обусловлено развитием эрозионных процессов в бассейнах рек и различием в составе водовмещающих горных пород, а не только антропогенным воздействием. В то же время модуль ионного стока р. Северная Двина составляет около 40 т/км² в год,

что на 25% больше, чем у р. Печора, протекающей по схожим породам осадочного чехла [2].

3. Интегральная оценка степени негативного воздействия речного стока на качество морских вод, проведенная А. С. Булавиной [1], позволила ей сделать вывод, что водосборные бассейны крупных рек Архангельской обл. по состоянию на 2018 г. относятся к разным категориям по степени воздействия. Так, реки Северная Двина и Вычегда характеризуются сильным, Онега — умеренным, а Пинега и Мезень — слабым воздействием речного стока на качество морских вод. В то время как реки Кольско-Карельского побережья характеризуются в основном умеренным и слабым воздействием, хотя плотность антропогенных источников загрязнения этой территории намного выше, чем в Архангельской обл. (см. рис. 1б).

Все вышеизложенное определяет актуальность дальнейшего изучения рек восточной части водосборного бассейна Белого моря с применением современного объективного аппарата геоморфометрии.

Цель исследования — оценить потенциальную предрасположенность основных рек Архангельской области к сносу и накоплению осадочного материала (в том числе и загрязненного) на основе расчета геоморфометрических параметров рельефа.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И МИГРАЦИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ ДЕТАЛИЗАЦИИ

Основным источником загрязнения территории Архангельской области на глобальном уровне выступает Европейский центр дестабилизации окружающей среды [5]. В результате тропосферного переноса северные регионы РФ являются областью глобального выпадения загрязняющих веществ (органических соединений и тяжелых металлов), накапливаемых за счет атмосферных выбросов индустриально развитых стран Западной Европы. Непосредственно на границе с исследуемым регионом к таковым относятся Норвегия — соединения никеля, меди, марганца, ртути; Финляндия — трудноокисляемые органические вещества, соединения меди, железа [8]. Наибольшее накопление загрязняющих веществ на территории Архангельской обл. происходит зимой в связи с преобладанием ветров юго-западного направления. А из-за длительности зимнего периода регион выступает в большей степени реципиентом трансграничного загрязнения, нежели донором.

На региональном уровне отмечаются два крупных очага загрязнения с потенциалом включения в тропосферный трансграничный перенос — Кольский полуостров и г. Норильск. Для исследуемого региона преимущественное значение имеют выбросы предприятий Кольского полуострова (см. рис. 1а). То есть и на региональном уровне Архангельская обл. выступает как приемник поллютантов.

Основным видом переноса загрязнения от глобальных и региональных источников является атмосферный тип с жидкими (дожди) и доминирующими твердыми (снег) осадками. В дальнейшем происходит перераспределение загрязняющих веществ в зависимости от характера эрозионных процессов и форм рельефа.

Снег в высоких и умеренных широтах — основной первичный накопитель поллютантов, что подтверждается массовыми анализами проб снега на водосборах [18]. В среднем за год в Архангельской обл. выпадает около 33% осадков в твердом (снег), 55% — жидком (дождь) и 12% — смешанном видах (снег с дождем). Но жидкие осадки достаточно равномерно включаются в сток вод и частично поглощаются почвами и породами. Для осадков в твердом и смешанном видах ситуация выглядит иначе. Как и для всех северных регионов России, ряд специфических особенностей формирования химического состава вод обусловлен климатическими параметрами [18]: питание рек в большей степени определяется атмосферными осадками, до 65% годового стока региона приходится на весеннее половодье; аккумуляция атмосферных выпадений в снежном покрове происходит в течение длительного времени (от 5 на юге до 10 месяцев на

севере), а в короткий период весеннего половодья они лавинно поступают в водосборные бассейны. По мнению Т.И. Моисеенко [18], во время снеготаяния почва находится в промерзшем состоянии, т.е. ее верхний слой практически водонепроницаем в течение почти всего периода снеготаяния, и выносимый материал почти не накапливается в почвах и породах.

Авторы считают, что этот процесс включает в себе несколько последовательных стадий, характеризующихся разными природными процессами. На первом этапе сток происходит по мерзлым грунтам, перенося материал, законсервированный ранее в снежном покрове (плоскостной смыв). На втором этапе плоскостной смыв осуществляется по частично оттаявшим грунтам, и к переносимому материалу добавляются взвешенные частицы из размываемых почв и горных пород. Происходит выщелачивание карбонатных и сульфатных пород палеозоя под действием сульфатов, нитратов и хлора, выпадающих с дождями. Вместе с тяжелыми металлами значимую роль в формировании трансграничного загрязнения атмосферного воздуха и осадков играет перенос кислотообразующих соединений, главным образом газообразных оксидов серы и азота. В процессе трансграничного переноса этих соединений происходит их химическая трансформация до кислотных ионов и, как следствие, выпадение на территории соседних регионов в виде кислотных осадков и сухого осаждения. Исследования, проведенные для Архангельской обл., говорят о том, что в 88% случаев нейтрализация осадков не происходит, что указывает на недостаток в их составе кислотных нейтрализаторов [19]. В то же время невысокая минерализация речных вод свидетельствует о том, что нейтрализация все же осуществляется, в основном за счет горных пород (карбонаты и сульфаты палеозоя). Следует отметить, что плоскостной сток происходит по склонам не сплошным слоем, а струями временных водотоков различной величины, по сети борозд, промоин и ложбин, распределенных в соответствии с микрорельефом местности.

На третьем этапе при освобождении речных потоков от ледового покрова включается линейная эрозия почв.

В целом время начала каждого из трех вышеперечисленных этапов обусловлено не только температурой, но и уклоном, экспозицией, профильной кривизной склонов, а также расчлененностью местности, которая отражается в значении индекса расчлененности рельефа. Все эти параметры могут быть рассчитаны по цифровой модели рельефа.

На локальном (местном) уровне источниками загрязнения являются Архангельская и Котласская промышленные агломерации, крупные объекты лесохимической отрасли, интенсивная эксплуатация лесных ресурсов с их последующей переработкой

и, в значительно меньшей степени, освоение месторождений полезных ископаемых.

По степени отрицательного воздействия на водные объекты Архангельской обл., к приоритетными, в первую очередь, относятся предприятия лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, а также объекты сельского хозяйства, нефтесервиса и социальной инфраструктуры. Обычно считается, что область загрязнения от данных объектов носит локальный характер и, как правило, ограничивается площадью производственных объектов и населенных пунктов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наши данные свидетельствуют о том, что геоморфометрический анализ цифровой модели рельефа (ЦМР) региона позволяет выделять зоны сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) осадочного материала, включая загрязняющие вещества. На площадях аккумулятивного для атмосферного переноса рельефа — картировать площади бессточных накопителей (впадины), способствующие постепенному смыву поллютантов в поверхностные воды в периоды паводков и таяния снега, а также их аккумуляции и проникновению вглубь к водоносным горизонтам [10, 11, 13].

Расчет всех геоморфометрических параметров осуществлялся на основе ЦМР Архангельской обл. [4] в программной среде SAGA GIS. В качестве исходной ЦМР была выбрана находящаяся в свободном доступе ЦМР ASTER GDEM v2, полностью покрывающая, в отличие от наиболее часто используемой ЦМР SRTM, всю площадь исследований, с разрешением 1 угловая секунда (~30×30 м), размер сцены 4100 на 4200 элементов (вся территория Архангельской обл., 12734342 ячеек). ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) — глобальная цифровая модель рельефа, разработанная Министерством экономики, торговли и промышленности Японии (Ministry of Economy, Trade, and Industry, METI) и Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA). Для создания ASTER GDEM использовалась автоматическая обработка всего архива данных ASTER с 1999 г. [4, 9]. Вторая версия ASTER GDEM вышла в декабре 2011 г., коррекция модели продолжается и по настоящее время.

Как и все существующие ЦМР ASTER GDEM v2, содержит участки с отсутствующими данными (“пустоты”), а также артефакты и “шумы”. Подготовка ЦМР включала в себя следующие операции: извлечение и объединение исходных данных; замену аномальных значений высотных отметок и “пустот”, устранение ошибок, возникающих при

наложении снимков (модуль DTM Filter) [4]. Отсутствующие данные (1.24% от площади исследования) были заполнены данными ЦМР GMTED2010 (одна сцена 50n030e_20101117_gmted_mea075) с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1 угловой секунды. Гидрологическая коррекция ЦМР осуществлялась с помощью модуля Fill Sinks по методу L. Wang и H. Liu [24]. Модель проверялась на релевантность [6]. Дальнейшие расчеты проводились по подготовленной и гидрологически корректной ЦМР с исходным разрешением 30×30 м (рис. 2а).

Для расчета площади водосборных бассейнов авторами был использован алгоритм MFD, включенный в программную среду SAGA GIS (рис. 2в), позволяющий учитывать эффект расхождения водотоков [15].

Затем было проведено бассейновое районирование территории по следующим геоморфометрическим параметрам: площадь бассейна, общая длина водотоков, топографический индекс влажности (TWI), индекс расчлененности рельефа (TRI), индекс потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор) [4]; при гидрологической коррекции ЦМР рассчитана плотность бессточных впадин на единицу площади [14]; при сопоставлении расчетов угла наклона, LS-фактора и индекса расчлененности рельефа осуществлено деление территории на области сноса, транзита и накопления осадочного материала [13].

Понятие водосборной площади имеет большое значение при гидрологическом и геоэкологическом анализе, так как этот параметр определяет площадь участка, влага с которого (дождь, талая вода и т.д.) может быть суммирована. В гидрологии и геоморфометрии понятие водосборной площади имеет разную смысловую нагрузку. В гидрологическом смысле водосборный бассейн — это часть земной поверхности, с которой происходит сток поверхностных и подземных вод в конкретный водоем или водоток, включая его притоки (рис. 2б). Бассейн каждого водоема включает в себя как поверхностный, так и подземный водосборы. На практике определение границ подземного водосбора сложно, поэтому за величину водосборного бассейна чаще принимают только площадь поверхностного водосбора [7].

Применительно к цифровым моделям рельефа можно говорить об общей водосборной площади и рассматривать ячейку ЦМР как некоторый конечный участок площади, в котором суммируются осадки. При расчете средствами ГИС значение конкретной ячейки ЦМР равно площади участка, с которого стекаются потоки в данную конкретную ячейку (см. рис. 2в).

Водосборная площадь в геоморфометрическом анализе представляет собой площадь аккумуляции стекающих вод и больше соответствует понятию

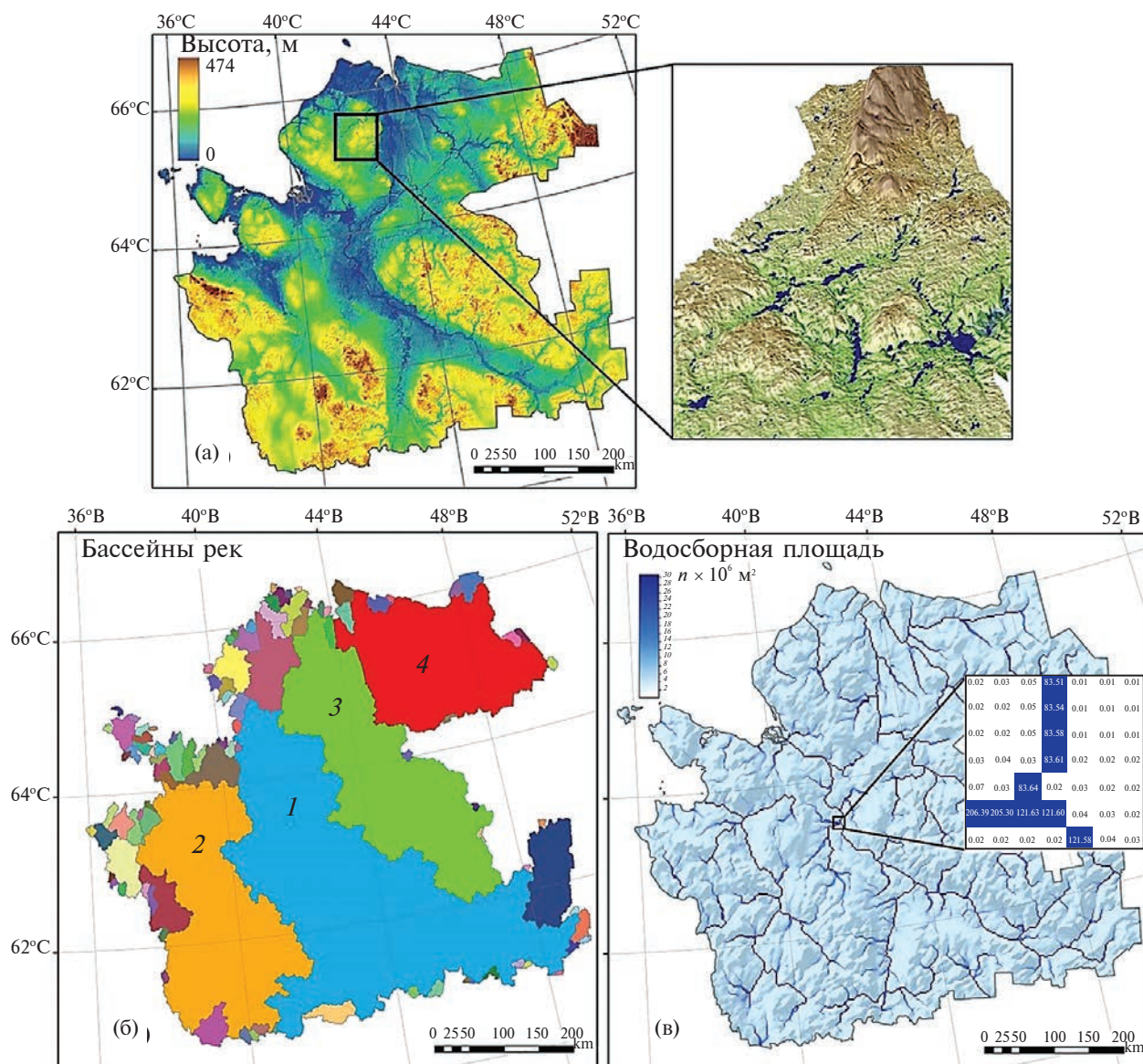


Рис. 2. Цифровая модель рельефа с разрешением 1 угловая секунда и ее увеличенный фрагмент (а) и схемы водосборных площадей крупных рек в пределах Архангельской обл. в гидрологическом (б) и геоморфометрическом (в) понятиях. б — бассейны крупных рек: 1 — Северной Двины, 2 — Онеги, 3 — Пинеги, 4 — Мезени.

долины реки с учетом поймы и частично первой надпойменной террасы, в отличие от водосборного бассейна в его классическом понимании, и не охватывает всю площадь стока поверхностных вод. Такое различие предполагает проведение раздельного анализа площадей максимального развития плоскостной эрозии, зон сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) переносимого материала. Является ли это недостатком геоморфометрического анализа? На наш взгляд, это техническая особенность применяемой процедуры, требующей учета ее особенностей.

Как указывалось выше, рельеф Архангельской обл. представляет собой сочетание возвышенностей, разделенных протяженными долинами

крупных рек: Северная Двина, Онега, Пинега, Мезень, которые на региональном уровне являются основными зонами транзита и аккумуляции осадочного материала. Естественно, что основные источники поступающего в реки материала — их водосборные бассейны, “ядром” которых являются плоские эрозионные палеозойские плато, сложенные каменноугольными и пермскими карбонатными и сульфатными породами. Поскольку углы наклона склонов рельефа региона характеризуются малыми значениями, то водоразделы плохо выражены, и для определения площади водосборных бассейнов применяется понятие площади речных систем (совокупность всех рек, впадающих главную реку). В результате часть водосборного бассейна,

для которого характерен только плоскостной смыв без выраженных постоянных водотоков, обычно не рассматривается и не учитывается.

Для плоских поверхностей плато характерно также наличие бессточных впадин (покрывающих 38% всей площади региона) с малыми глубинами (от 1 до 5 м), сброс воды из которых во время снеготаяния тоже не учитывается.

Исторически сложилось, что освоение региона шло по крупным водотокам, особенно вдоль Северной Двины. В результате основное антропогенное воздействие на природную среду приурочено к крупным рекам региона. Помимо расположенных на берегах рек предприятий и населенных пунктов, к видам воздействия относятся сельскохозяйственные работы, вырубка лесов на водосборах, провоцирующая развитие эрозионных процессов (в первую очередь смыв почв и размыв берегов). Кроме того, вырубка лесов сопровождалась многолетним молевым сплавом. Объединяют эти процессы водный тип загрязнения водоемов и трансформация берегов за счет интенсивного развития эрозионных процессов. Для фиксирования этих процессов и оценки их развития необходим расчет гидрологических и геометрических параметров рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отклик геологической среды на любой вид природного и антропогенного воздействия непосредственно взаимосвязан с рельефом местности. Все элементы и формы рельефа по своей природной направленности можно разделить на три основные группы, к которым относятся зоны сноса (денудации), транзита (перемещения) и накопления (аккумуляции) осадочного материала. Воздействие антропогенного загрязнения на каждую из этих зон различно. В работе [16] отмечается, что в областях сноса проникновение загрязняющих веществ на глубину ограничено, а площадное распространение, напротив, значительно. В то же время, это же загрязнение в зонах накопления вызывает его аккумуляцию и проникновение в глубинные горизонты геологической среды, обуславливая смену химического состава подземных вод. Поскольку зоны сноса приурочены к повышенным формам рельефа, там аккумулируется наименьшее количество загрязняющих веществ. В зонах транзита (на склонах, надпойменных террасах) происходит перенос загрязнения в зоны накопления (поймы рек, понижения и замкнутые формы рельефа), которые характеризуются наибольшей способностью к аккумуляции загрязняющих веществ.

Упрощенный вариант районирования территории Архангельской обл. приведен на рис. 3. Здесь зонам сноса соответствуют максимальные значения высотных отметок, LS-фактора, индекса расчлененности рельефа; зонам размыва и транзита

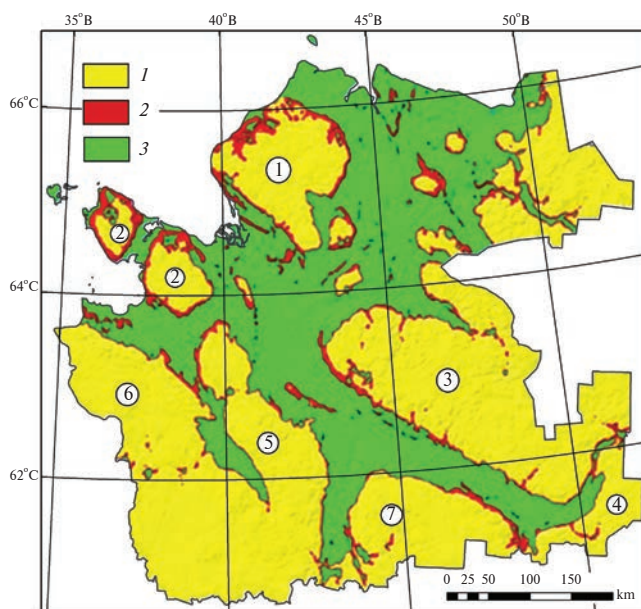


Рис. 3. Схема районирования региона по условиям накопления и переноса материала: 1–3 — зоны: 1 — сноса, 2 — размыва и транзита, 3 — аккумуляции. Цифры в кружках — возвышенности и плато: 1 — Беломорско-Кулойское плато; 2 — плато Онежского полуострова; 3 — Двино-Мезенская возвышенность; 4 — возвышенность Северные Увалы; 5 — Онего-Двинская возвышенность; 6 — Ветренный Пояс; 7 — Вельско-Устьянское плато.

материала — максимальные значения углов наклона, определенный характер кривизны склонов и их экспозиции; зонам аккумуляции — максимальные значения топографического индекса влажности и минимальные значения базиса эрозии.

Плато и возвышенности имеют в основном ровную поверхность с малыми углами наклона. Коренные породы этих структур рельефа являются растворимыми, и им присущи процессы химического выщелачивания, сопровождающиеся развитием карстовых процессов [14]. Поэтому на территории области широко развиты бессточные понижения, картируемые в виде бессточных впадин на цифровой модели рельефа и являющиеся локальными аккумуляторами водного материала от таяния снега и выпадения осадков. Обычно считается, что бессточным впадинам на ЦМР соответствуют болота, широко развитые в регионе. Вопрос этот достаточно актуален для заболоченных территорий бореальных лесов, так как для учета величины стока вводятся коэффициенты заболоченности, озерности, лесистости, но не учитываются те бессточные впадины, которые не совпадают с болотами.

Нами был произведен расчет плотности бессточных впадин и их кластерных значений [14] и проведено сопоставление с плотностью болот (рис. 4а). Как видно из рис. 4а, далеко не все территории максимальных значений плотности бессточных впадин совпадают с площадями повышенной

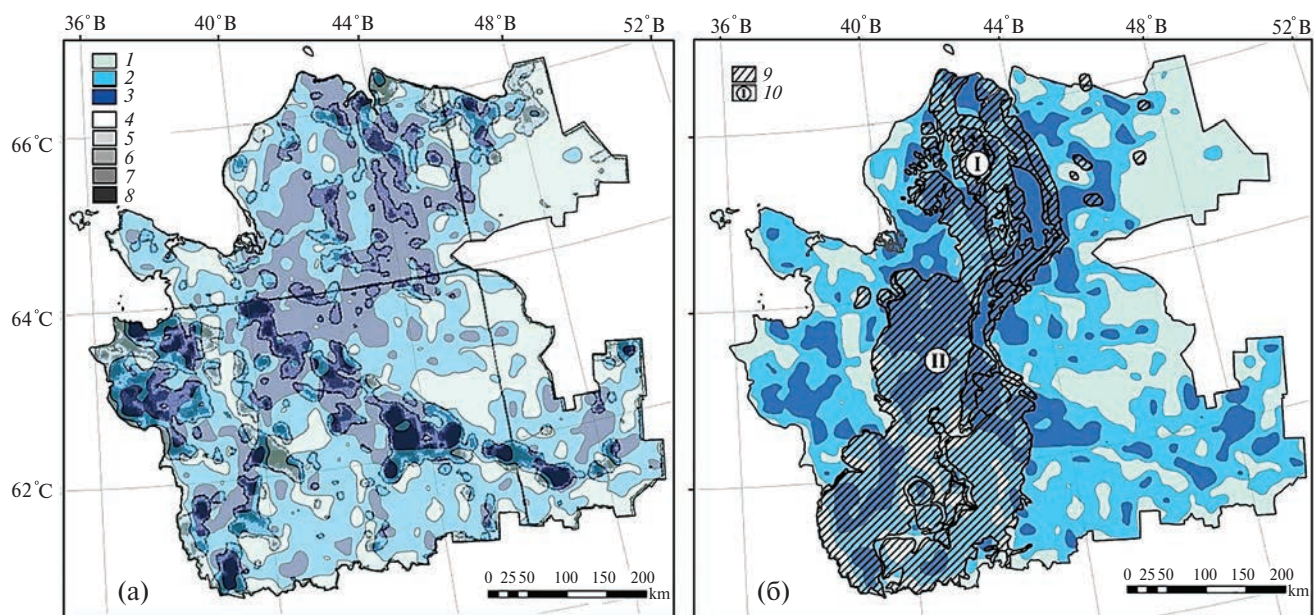


Рис. 4. Схема сопоставления кластерных значений плотности бессточных впадин с плотностью болот (а) и распространением карстующихся пород (б) на территории Архангельской обл. 1–3 — кластерные значения плотности бессточных впадин: 1 — минимальные; 2 — средние; 3 — максимальные; 4–8 — плотность болот, %: 4 — менее 10; 5 — 10–20; 6 — 20–30; 7 — 30–40; 8 — более 40; 9 — полоса развития карстующихся пород, 10 — типы карста: I — открытый, II — покрытый.

плотности болот. То есть для исследуемого региона необходимо учитывать также площадь бессточных впадин при оценке плоскостного смыва.

Средняя высота снежного покрова к концу зимы составляет 0.5–0.6 м. Сопоставляя эту величину с распределением глубин заполнения бессточных впадин (доминирует глубина 1 м), можно сделать вывод, что в подавляющем количестве бессточных впадин снеговой покров не участвует в стоке вод, смыве и выносе материала ни в ионном, ни

во взвешенном состоянии. Здесь следует учитывать еще и тот факт, что 32.4% территории области занято карстующимися породами (см. рис. 4б). При этом выделяется 2 типа карста: открытый и покрытый (задернованный) [14]. Первый тип (цифра I на рис. 4б) характерен для Беломорско-Кулойского плато. В областях развития открытого карста склоновый сток поглощается карстовыми воронками, повышая тем самым долю подземного питания. То есть часть стока переводится из поверхностного

Таблица 1. Характеристика и распределение значений углов наклона поверхности для территории Архангельской области

Значение угла наклона, в град.	Количество ячеек	Занимаемая площадь		Характеристика	Эрозионные процессы
		км ²	%		
менее 2	236369890	402853.71	68.58252	Не относятся к склонам	Отсутствуют
2–4	83418732	142173.55	24.20387	Очень пологие	Образование мелких оврагов и борозд
4–8	23399951	39881.38	6.78948	Пологие	Образование более крупных оврагов и борозд
8–15	1424129	2427.19	0.41321	Средней крутизны	Плоскостной смыв почвенного покрова
15–35	37495	63.90	0.01088	Крутые	Гравитационные процессы и выветривание
35 и более	152	0.26	0.00004	Очень крутые	Гравитационные процессы, выветривание и денудация
Всего	344650349	587400.00	100.00		

в подземный вместе с содержащимися в нем загрязняющими веществами. В областях покрытого карста (цифра II на рис. 4б) осадки частично аккумулируются в понижениях рельефа.

Рассмотрим склоновые зоны размыва и транзита материала (см. рис. 3). В табл. 1 приведена статистика значений углов наклона, рассчитанная на ЦМР с разрешением 1 угловая секунда (30×30 м), классификация склонов приведена по Н.И. Николаеву [17].

В целом доля углов наклона поверхности в интервале $< 8^\circ$ составляет более 90%, и с ними связано образование борозд и мелких оврагов. Доля углов наклона, с которыми, теоретически, связаны процессы плоскостного смыва почвенного покрова (от 8 до 15°), составляет всего 0.4%. Они, как правило, приурочены к долинам рек плато, в первую очередь Беломорско-Кулойского плато, в которых формируются своеобразные геохимические обстановки. Склонов, на которых возможно гравитационное оползание грунтов ($> 15^\circ$) на территории области всего 0.01%. Значения углов наклона меняются вдоль водотоков, и в этом случае они являются относительно локальным параметром. На более детальном уровне в пределах склоновых форм были

выделены локальные участки аккумуляции осадков по значениям профильной кривизны [4].

Затем были рассчитаны водосборные бассейны (в их геоморфометрическом значении) крупных рек региона: Северной Двины, Онеги, Пинеги, Мезени (рис. 5). Бассейны рассчитывались в территориальных границах Архангельской обл. и отдельно для каждой из четырех рек. Несмотря на то, что р. Пинега является притоком Северной Двины, их бассейны были разделены, поскольку они отличаются порядком водотоков (для Пинеги порядок 8, Северной Двины — 10) и источниками питания. Для Пинеги характерна большая доля подземного питания за счет развития открытого карста. Речная вода здесь имеет гидрокарбонатный состав и формируется под действием химического выветривания коренных карбонатных пород палеозоя.

В целом, площади водосборных бассейнов (по данным цифрового моделирования) вышеперечисленных рек меньше, чем площади бассейнов в их классическом варианте (табл. 2), что вполне закономерно, учитывая методы расчета. Исключение составляют реки Онега и Пинега, их водосборные бассейны практически совпадают с бровками их долин.

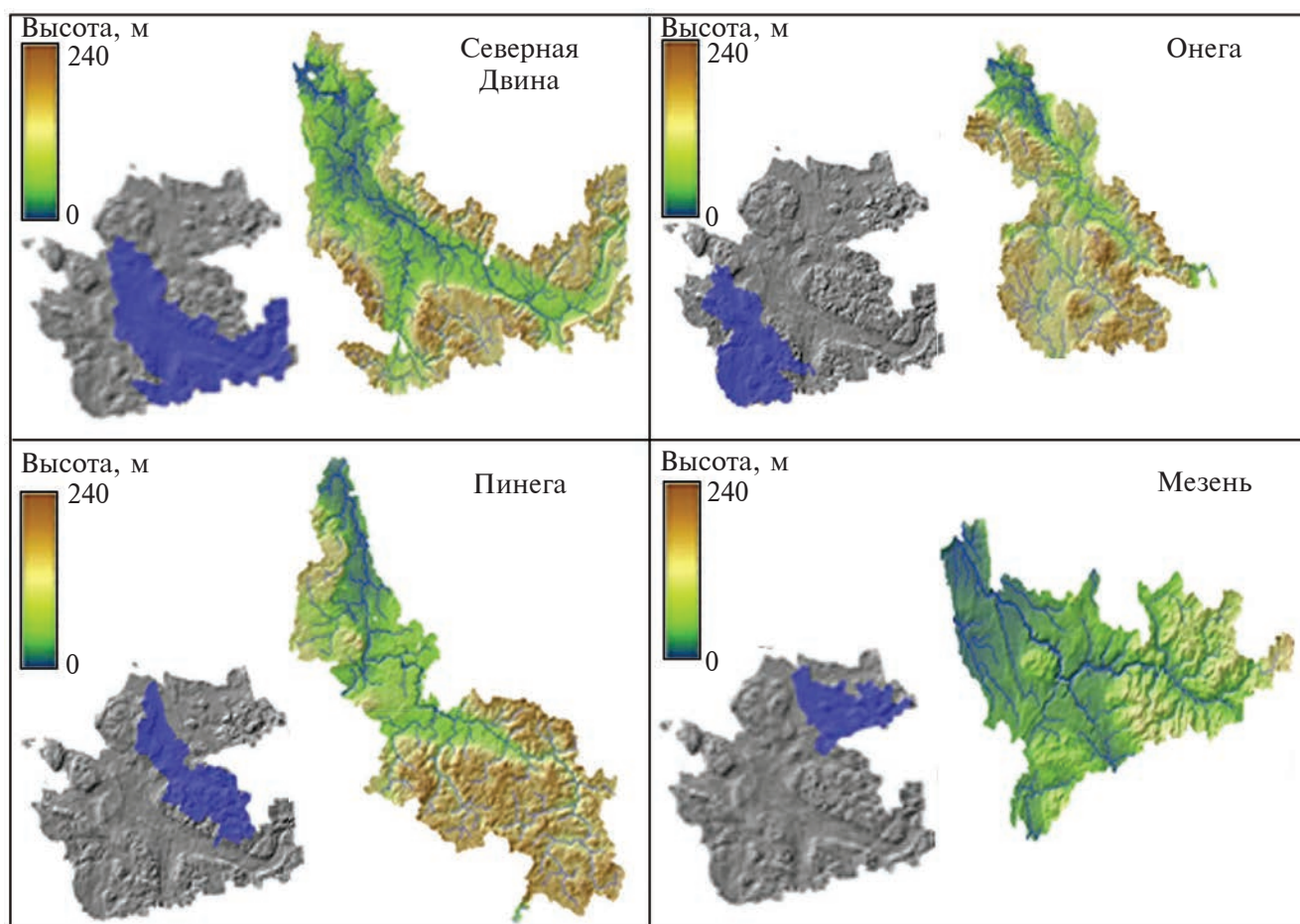


Рис. 5. Схемы основных водосборных бассейнов рек по данным цифрового моделирования.

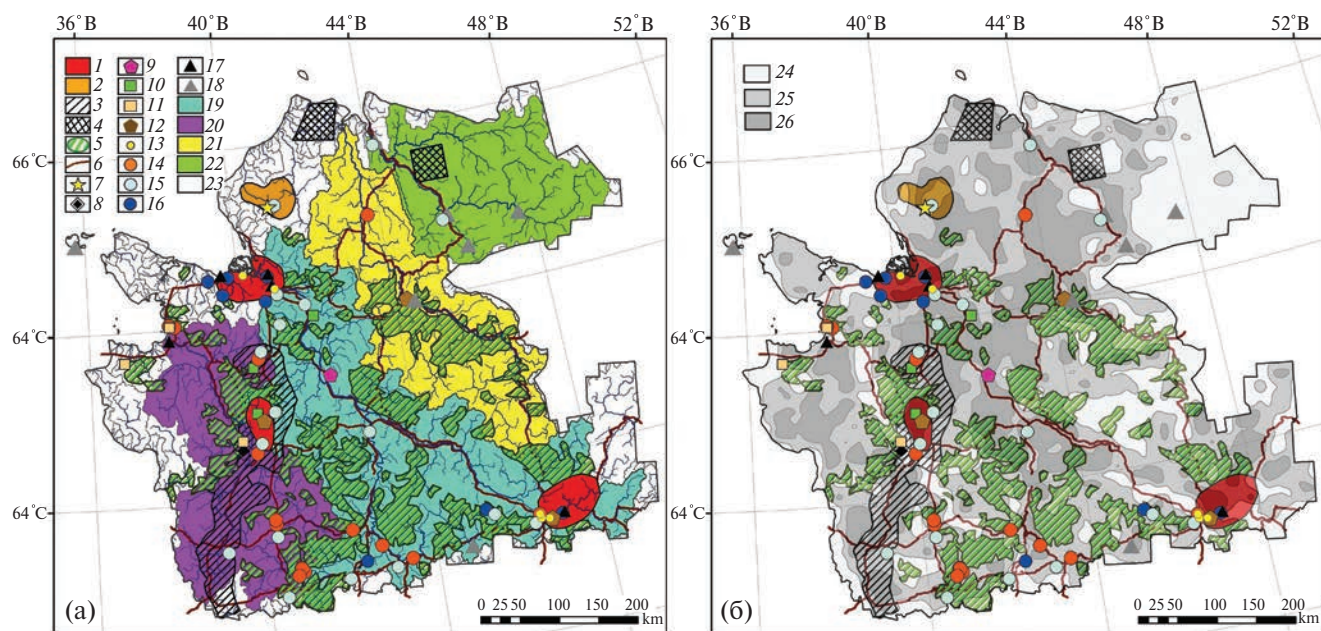


Рис. 6. Схемы сопоставления источников антропогенного воздействия на природную среду Архангельской обл.: а — с бассейнами крупных рек, б — с кластерными значениями плотности бессточных впадин. 1–5 — зоны: 1 — интенсивного промышленного воздействия; 2 — горнодобывающие; 3 — воздействия космодрома; 4 — сброса отработанных ступеней ракет; 5 — лесопромышленного воздействия; 6 — дороги общего и федерального пользования; 7–14 — месторождения: 7 — алмазов, 8 — бокситов, 9 — гипсов, 10 — известняков, 11 — строительных камней, 12 — глин, 13 — песков, 14 — песчано-гравийного материала, 15 — пресных подземных вод, 16 — минеральных подземных вод; 17 — ТЭЦ; 18 — крупные дизельные электростанции; 19–23 — бассейны рек: 19 — Северной Двины, 20 — Онеги, 21 — Пинеги, 22 — Мезени, 23 — всех остальных; 24–26 — кластерные значения плотности бессточных впадин: 24 — минимальные, 25 — средние, 26 — максимальные.

Речные долины в зависимости от ряда параметров (геологический возраст, тектонические движения, состав слагающих их горных пород и их физико-механические свойства) имеют различные продольные уклоны и очертания в плане и поперечном разрезе. Анализ крупных рек региона показал, что их склоны и водосборные бассейны отличаются друг от друга по вышеперечисленным факторам. Поэтому было проведено сопоставление бассейнов этих рек по следующим геоморфометрическим

параметрам: площадь бассейна, общая длина водотоков, среднее значение индекса влажности, среднее значение индекса расчлененности рельефа, среднее значение LS-фактора, результаты представлены в табл. 2 по [4] с дополнениями.

Индекс потенциала плоскостной эрозии (LS-фактор), показывает, чем выше значения данного параметра, тем больше выражено влияние рельефа на процессы водной эрозии (плоскостного

Таблица 2. Общие и геоморфометрические параметры водосборных бассейнов крупных рек Архангельской области

Параметр	Бассейны рек			
	Северная Двина	Онега	Пинега	Мезень
Площадь водосборного бассейна, км ² общая* / в пределах области	357000 / 103964	56900 / 51654	42000 / 42000	78000 / 33030
Протяженность, км, общая* / в пределах области	744 / 606	476 / 416	779 / 779	966 / 710
Объем среднегодового стока*, км ³	109	18.8	13	28
Порядок водотока по методике Стралера (1 — минимальный, 10 — максимальный)	10	9	8	9
Среднее значение LS-фактора	0.0042	0.0037	0.0052	0.0039
Среднее значение индекса расчлененности рельефа	4.93	4.50	6.00	4.62
Среднее значение индекса влажности	–0.082	0.066	–0.329	0.046

* по данным с сайта <https://textual.ru/gvr/>

смыва) [22, 24]. Согласно средним значениям данного параметра, в бассейнах Северной Двины и Пинеги более развита плоскостная эрозия, чем в бассейнах Онеги и Мезени.

Индекс расчлененности рельефа характеризует степень изрезанности территории [23]. Средние значения этого параметра показывают, что наиболее разнороден рельеф в бассейне Пинеги (здесь развиты разнообразные формы карстового рельефа).

Топографический индекс влажности является показателем гидроморфности территории, т.е. склонности ее к накоплению или отторжению воды [21]. В геоэкологических исследованиях топографический индекс влажности позволяет выделять площади преимущественного накопления осадочного материала. Средние значения данного параметра позволяют сделать вывод, что в бассейнах Онеги (повышенная плотность болот) и Мезени (повышенная плотность бессточных впадин) преобладают аккумулятивные процессы, а в бассейнах Северной Двины и Пинеги — процессы смыва и транзита и, как следствие, переноса загрязняющих веществ до геохимического барьера на уровне устья Северной Двины — Двинского залива Белого моря.

Авторами было проведено сопоставление основных источников антропогенного воздействия на природную среду региона, взятыми из проекта “Схема территориального планирования Архангельской области” (URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minstroy/shemes/>) со схемами бассейнового районирования и кластерных значений плотности бессточных впадин (рис. 6).

В результате сопоставления данных можно констатировать пространственное совпадение источников антропогенного воздействия на окружающую среду с зоной аккумуляции, выделенной по ЦМР Архангельской обл. на основе расчета геоморфометрических параметров [12]. Воздействие промышленных предприятий происходит за счет сброса загрязненных вод в реки региона или в результате аварийных предприятий и однозначно коррелирует с местоположением предприятий и агломераций.

Вклад сельскохозяйственных угодий и пашен в регионе не является значимым, так как площадь их составляет суммарно только 2.5%, причем из них только 0.5% подвержено эрозионным процессам. Из всех сельхозугодий 55% приходится на сенокосы и пастбища. Сельскохозяйственные предприятия области преимущественно расположены в пойме Северной Двины и ее притоков и мало влияют на снос материала.

Иначе обстоит дело с лесозаготовками и транспортировкой древесины, приуроченными к водосборным бассейнам рек. Сопоставление материалов показало приуроченность зон лесопромышленного

воздействия (лесозаготовка и транспортировка древесины) к природным зонам сноса и, в большей степени, транзита материала [12].

Основной вид воздействия при лесохозяйственной деятельности — нарушение целостности почвенно-растительного покрова [12], что, в свою очередь, влечет за собой активизацию склоновых процессов, и, как следствие, повышенный вынос взвешенного материала в водотоки.

Таким образом, по р. Северная Двина происходит основной вынос поллютантов в бассейн Белого моря, что связано как с большой площадью водосбора, так и с расположением по ее берегам основных промышленных объектов. Немалый вклад вносят и природные процессы, обусловленные геологическим строением и рельефом территории, что подтверждается рассчитанными значениями геоморфометрических параметров. Причем в водосборном бассейне Северной Двины преобладает плоскостной смыв.

Территория водосбора р. Онега является аккумулятором загрязнения в регионе. Это подтверждается и максимальным количеством бессточных накопителей здесь, в качестве которых выступают болота с застойными водами и карстовые понижения в рельефе. В меньшей степени процесс аккумуляции характерен и для водосборного бассейна р. Мезень, но здесь он обусловлен большей плотностью бессточных впадин.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена восточная (Архангельская) часть водосборного бассейна Белого моря на примере наиболее крупных рек региона — Северной Двины, Онеги, Пинеги и Мезени. Анализ источников загрязнения на глобальном (Европейский центр дестабилизации окружающей среды), региональном (Кольский промышленный узел) и локальном уровнях (предприятия Архангельской области) показал, что регион является реципиентом загрязнения. Основным путем переноса загрязняющих веществ является атмосферный, который в дальнейшем трансформируется в водный перенос во время паводков. На локальном уровне перенос осуществляется за счет стока вод. Во всех вышеперечисленных вариантах характер рельефа играет доминирующую роль в перераспределении загрязнения. Каждый из вышеперечисленных видов переноса может быть учтен и оценен при расчете геоморфометрических параметров рельефа.

Геоморфометрические параметры, рассчитываемые на основе цифровой модели рельефа, количественно демонстрируют потенциальную предрасположенность территории к сносу, транзиту и накоплению осадочного материала. Показана высокая роль бессточных впадин как приемников и накопителей загрязнения при расчете стока

в поверхностные и подземные воды и переносе материала как в ионной, так и во взвешенной форме. На основе расчета таких параметров, как топографический индекс влажности, индекс расчлененности рельефа, LS-фактор сделан вывод о том, что в бассейнах крупных рек Северная Двина и Пинега преобладают процессы смыва и транзита, и, как следствие, переноса загрязняющих веществ. А в бассейнах рек Онега и Мезень преимущественно развиты процессы аккумуляции осадочного материала.

При планировании и осуществлении хозяйственной деятельности с целью сохранения качества водных объектов, помимо охранных и мониторинговых мероприятий, целесообразно применение геоморфометрического подхода, как объективного количественного инструмента оценки территории.

Исследования проведены в рамках государственного задания № 122011300380-5 Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавина А. С. Районирование водосбора Белого моря по степени воздействия материкового стока на морскую водную среду // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-117-127>
2. Георгиади А. Г., Даниленко А. О. Многолетние изменения водного и ионного стока Северной Двины и Печоры // Вестник РФФИ. 2022. № 3–4. С. 103–114. <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-103-121>
3. Зверев В. П. Подземные воды земной коры и геологические процессы. М.: Научный мир, 2006. 256 с.
4. Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Полякова Е. В., Чистова З. Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геоэкологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: Социосфера, 2019. 176 с.
5. Лосев К. С. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. М.: Космосинформ, 2001. 399 с.
6. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 58–67. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>
7. Михайлов В. Н., Добролюбов С. А. Гидрология: учебник для ВУЗов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.
8. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. 684 с.
9. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 117–127. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>
10. Полякова Е. В. Геоморфометрический подход в геоэкологических исследованиях северных территорий страны // Успехи современного естествознания. 2018. № 3. С. 117–122. <https://doi.org/10.17513/use.36712>
11. Полякова Е. В. Учет геоморфометрических параметров рельефа при ведении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // Евразийский союз ученых. 2019. № 3–2(60). С. 33–37. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37>
12. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Применение геоморфометрического анализа рельефа при осуществлении хозяйственной деятельности на территории Архангельской области // Геоэкология. 2021. № 2. С. 86–95. <https://doi.org/10.31857/S0869780921020065>
13. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Цифровое моделирование рельефа в оценке вероятности развития эрозионных процессов в северных регионах страны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 95–104. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104>
14. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б., Беленович Т. Я. Применение глобальной цифровой модели рельефа ASTER GDEM v2 для выделения районов возможной активизации карстовых процессов на территории Архангельской области // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2021. Т. 163. № 2. С. 302–319. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.302-319>
15. Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Минеев А. Л. Алгоритм расчёта базисных поверхностей на основе цифровой модели рельефа в программном обеспечении SAGA GIS (на примере Архангельской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 104–115. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115>
16. Руш Е. А. Анализ методов геоэкологической оценки природно-техногенных систем // Экология промышленного производства. 2006. № 3. С. 2–8
17. Рычагов Г. И. Общая геоморфология. М.: Наука, 2006. 416 с.
18. Система Белого моря. Т. 1. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. 480 с.
19. Трубицина О. П. Кислотно-щелочные особенности осадков прибрежной зоны Архангельской области: ретроспективный анализ // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер. Естественные науки. 2016. № 4. С. 17–25. <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.4.17>
20. Филатов Н. Н., Тержевик А. Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.

21. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications / T. Hengl, H. I. Reuter (Eds.). Amsterdam, Elsevier. 2009. 796 p.
22. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // *Hydrological Processes*. 1991. V. 5(1). P. 3–30.
23. Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot R. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity // *Int. Journal of Science*. 1999. V. 5 (1–4). P. 23–27.
24. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling // *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 2006. V. 20. № 2. P. 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF WATER BODIES IN THE DRAINAGE BASIN OF THE WHITE SEA BASED ON GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE RELIEF

E. V. Polyakova^{a, #}, Yu. G. Kutinov^a, Z. B. Chistova^a, A. L. Mineev^a

^a*Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural branch RAS,
Nikolskii prospect 20, Arkhangelsk, 163020 Russia*

[#]*E-mail: lenpo26@yandex.ru*

In the article, the authors considered the eastern part of the White Sea drainage basin within the administrative boundaries of the Arkhangelsk region. The aim of the study was to assess the potential predisposition of the main rivers in the Arkhangelsk region to the drift and accumulation of sedimentary material (including polluting material) based on the calculation of the geomorphometric parameters of the relief. Analysis of pollution sources at the global (European Center for Environmental Destabilization), regional (Kola industry) and local levels (enterprises of the Arkhangelsk region) showed that the region is a recipient of pollution. The main route of pollutant transport is atmospheric, which is further transformed during floods. At the local level, the transfer is carried out due to the runoff of water. In all of the above options, the nature of the relief has a dominant role in the redistribution of pollution. Each type of transport can be taken into account and evaluated when calculating the geomorphometric parameters of the relief, which quantitatively demonstrate the potential predisposition of the territory to the drift, transit and accumulation of sedimentary material. The high role of drainless depressions as receivers and accumulators of pollution in the calculation of runoff into surface and groundwater and the transfer of material, both in ionic and suspended form, is shown. Based on the calculation of such parameters as Topographic Wetness Index (TWI), Terrain Ruggedness Index (TRI), LS factor, it was concluded that in the basins of such large rivers of the Arkhangelsk region as the Northern Dvina and Pinega, the processes of washout and transit, and, as a result, the pollution transfer prevail. In the basins of the Onega and Mezen rivers, accumulation of sedimentary material is predominant.

Keywords: *river drainage basins, catchment area, digital elevation model, geomorphometric relief parameters, Arkhangelsk region*

REFERENCES

1. Bulavina, A.S. [Zoning of water catchment area of the White Sea by the degree of continental runoff impact on the seawater environment]. *Vestnik MGTU*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 117–127. (in Russian) <https://doi.org/10.21443/1560-2018-21-1-117-127>
2. Georgiadi, A.G., Danilenko, A.O. [Perennial changes in water and ionic runoff of the Severnaya Dvina and Pechora rivers]. *Vestnik RFFI*, 2022, no. 3–4, pp. 103–114. (in Russian) <https://doi.org/10.22204/2410-4639-2022-115-116-03-04-103-121>
3. Zverev, V.P. [Subsurface water in the Earth crust and geological processes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2006, 256 p. (in Russian)
4. Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Polyakova E.V., Chistova, Z.B. [Choice of basic digital model of relief (DMR) for north Eurasian plains and its adjustment to geocological zoning (by the example of the Arkhangelsk region)]. Penza, Sotsiosfera Publ., 2019, 176 p. (in Russian)
5. Losev, K.S. [Ecological problems and prospects for the sustainable development of Russia in the 21st century]. Moscow, Kosmoinform Publ., 2001, 399 p. (in Russian)
6. Mineev, A.L., Polyakova E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova Z.B. [Reliability of digital model of relief of the Arkhangelsk region for conducting geocological research]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, vol.15, no.4, pp. 58–67. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>
7. Mikhailov, V.N., Dobrolyubov, S.A. [Hydrology. Textbook for the higher school]. Moscow, Berlin. Direct-Media Publ., 2017, 752 p. (in Russian)
8. [On the state and conservation of the environment in the Russian Federation in 2021. State report]. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russian Federation,

- Lomonosov Moscow State University, 2022, 684 p. (in Russian)
9. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. [Analysis of applicability of digital relief models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM to the study of the Russian Arctic areas]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 117–127. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>
 10. Polyakova, E.V. [Geomorphometric approach to geocological research of the northern regions of Russia]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 3, pp. 117–122. (in Russian) <https://doi.org/10.17513/use.36712>
 11. Polyakova, E.V. [Consideration of geomorphometric relief parameters upon economic activities in the Arkhangelsk region]. *Evrasiiskii soyuz uchenykh*, 2019, no. 3–2(60), pp. 33–37. (in Russian) <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.60.33-37>
 12. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. [Application of geomorphometric analysis of relief upon conducting economic activity in Arkhangelsk region]. *Geoekologiya*, 2021, no. 2, pp. 86–95. (in Russian) <https://doi.org/10.31857/S0869780921020065>
 13. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B. [Digital modeling of relief in assessing the probability of erosion development in the northern regions of Russia] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 95–104. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-95-104>
 14. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Mineev, A.L., Chistova, Z.B., Belenovich, T.Ya. [Application of digital model of relief ASTER GDEM v2 for outlining areas of possible karst development in the territory of Arkhangelsk region]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennyye nauki*, 2021, vol. 163, no. 2, pp. 302–319. (in Russian) <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.302-319>
 15. Polyakova, E.V., Kutinov, Yu.G., Chistova, Z.B., Mineev, A.L. [Algorithm of calculating basis surfaces in the digital relief model with SAGA GIS software (by the example of the Arkhangelsk region)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, vol. 20, no. 3, pp.104–115. (in Russian) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-104-115>
 16. Rush, E.A. [Analysis of methods of geocological assessment of natural-anthropogenic systems]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2006, no. 3, pp. 2–8 (in Russian)
 17. Rychagov, G.I. [General geomorphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 416 p. (in Russian)
 18. [The White Sea system. Vol. 1. The water drainage environment of the White Sea]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2010, 480 p. (in Russian)
 19. Trubitsina, O.P. [Acidic-alkaline specifics of sediments in the coastal zone of the Arkhangelsk region: a retrospective analysis]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser. Estestvennyye nauki*, 2016, no. 4, pp. 17–25. (in Russian) <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.4.17>
 20. Filatov, N.N., Terzhevik, A.Yu. [The White Sea and its catchment area under the effect of climatic and anthropogenic factors]. Petrozavodsk, Karelia Research Centre RAS, 2007, 335 p. (in Russian)
 21. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Hengl T., Reuter H. I. (Eds.). Amsterdam, Elsevier. 2009. 796 p.
 22. Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological processes*, 1991, vol. 5(1), pp. 3–30.
 23. Reily Shawn J., DeGloria Stephen D., Elliot Robert. A Terrain Ruggedness Index That Quantifies Topographic Heterogeneity. *Int. Journal of Science*, 1999, vol. 5(1–4), pp. 23–27.
 24. Wang, L., Liu, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК556.535.8+556.164

**ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕКИ ТУЗЛОВ
КАК ИНДИКАТОР ПОСЛЕДСТВИЙ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
В ВОСТОЧНОМ ДОНБАССЕ (РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

© 2024 г. А. Д. Сазонов^{1, 2, *}, В. Е. Закруткин²

¹Гидрохимический институт Росгидромета, пр. Стачки, 198, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

²Южный федеральный университет, Институт наук о Земле,
ул. Большая Садовая, 105/42, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*E-mail: alexei.sazonov2016@ya.ru

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

После доработки 19.11.2023 г.

Принята к публикации 26.01.2024 г.

В статье рассмотрены экологические проблемы территории Восточного Донбасса — крупной природно-техногенной аномалии на Юге России. В качестве индикатора последствий хозяйственной деятельности на данной территории послужила р. Тузлов. В частности, в ходе исследования была изучена пространственно-временная изменчивость переноса растворенных веществ, химического состава и качества воды реки за период 2003–2019 гг. Исследование проведено на основе данных государственной наблюдательной сети Росгидромета. Полученные результаты по транзиту растворенных веществ в верхней части бассейна показали увеличение переноса главных ионов и, напротив, убывающую тенденцию переноса соединений меди, цинка и фосфора фосфатов. В среднем течении реки продолжалось возрастание содержания главных ионов, а также зафиксировано резкое увеличение концентрации фосфора фосфатов. Ниже г. Новочеркасск — на замыкающем створе гидрохимических наблюдений — в наибольшей степени повысилось содержание фосфора фосфатов, соединений меди и цинка. Качество воды на протяжении рассматриваемого периода оставалось на уровне 4 класса (“грязная”). Исходя из полученных результатов, сделаны выводы о ведущей роли угледобывающей деятельности в увеличении содержания в воде главных ионов (прежде всего, за счет сульфат-ионов) и соединений железа общего. В то же время сельскохозяйственная деятельность на водосборе приводит к сокращению содержания в воде соединений меди, цинка и фосфора фосфатов. Однако в воде р. Тузлов, протекающей на наиболее урбанизированном участке, значительно увеличивалось содержание данных компонентов в воде.

Ключевые слова: река Тузлов, перенос веществ, химический состав, качество воды, Новочеркасск, Нижний Дон

DOI: 10.31857/S0869780924010084, EDN: GNRELZ

ВВЕДЕНИЕ

Восточный Донбасс — крупная природно-техногенная геохимическая провинция на Юге России. На протяжении десятков лет здесь велась угледобыча, что не могло не оставить серьезных последствий для окружающей среды. Реструктуризация большинства угольных шахт Ростовской обл. в 1990-е годы только усилила проявление неблагоприятных явлений, что подтверждается многочисленными исследованиями [4]. При этом наиболее высокую антропогенную нагрузку испытывают поверхностные и подземные воды. Под влиянием угледобывающей деятельности изменяется не только химический состав вод, но и характер питания рек. В частности, происходит усиление роли подземного питания. Поверхностные и подземные

воды становятся близки по своему химическому составу и теряют свою пригодность для хозяйственных и питьевых нужд.

Изучение происходящих на подобных территориях процессов требует детального рассмотрения изменчивости параметров отдельных объектов окружающей среды. В первую очередь, речь идет о речных системах, особенно малых и средних рек, которые являются важными индикаторами эколого-геохимических процессов на обширных водосборных площадях. В качестве такого объекта выступает бассейн р. Тузлов, расположенный на территории Восточного Донбасса и испытывающий колоссальную нагрузку, как от последствий угледобывающих предприятий, так и в результате интенсивной сельскохозяйственной деятельности на водосборе [7, 13].



Рис. 1. Схема бассейна р. Тузлов.

Тузлов — река степной зоны Юга России, протекающая в юго-западной части Ростовской обл. в пределах Приазовской природно-сельскохозяйственной зоны. Ее длина составляет 182 км, а площадь водосборного бассейна достигает 4680 км². Река берет начало на южном склоне Донецкого кряжа и впадает в Проток Ахсай — приток р. Дон в ее нижнем течении (рис. 1). Бассейн реки асимметричен и представлен левобережными притоками: реки Крепкая, Большой Несветай, Грушевка, Кадамовка и др. [9].

Бассейн р. Тузлов расположен в Шахтинском и Новошахтинском угледоугольных районах Восточного Донбасса. В результате затопления нерентабельных шахт трансформировался гидролого-гидрохимический режим реки [3, 4]. Как видно из табл. 1 в течение последних десятилетий поступление шахтных вод и некоторых растворенных в них веществ увеличивалось.

Сельскохозяйственная деятельность, осуществляемая на водосборе Тузлова, в наибольшей степени проявлена в преобразовании почвенного покрова. Большая часть речного бассейна занята пашнями. Нарушение естественных приповерхностных почвенных горизонтов приводит к деградации процессов естественной инфильтрации, возрастанию интенсивности водной и ветровой

Таблица 1. Объем поступления шахтных вод (W) и растворенных химических веществ (DC) в Восточном Донбассе [3]

Год	W , млн м ³ /год	DC, тыс. т в год				
		SO ₄	Cl	Ca	Mg	Fe
1966	75	131	34	7.3	16	0.1
1992	90	155	63	18	13	0.3
1999	45	66	17	7	6	0.3
2002	72	170	32	16	18	3.3
2006	73	204	23	22	19	6.0
2010	78	211	33	28	20	2.7
2015	79	222	27	23	21	2.7

эрозии, в результате чего может происходить обмеление рек бассейна.

В целом можно заключить, что бассейн р. Тузлов испытывает мощное антропогенное воздействие, которое не могло не сказаться на высоком уровне загрязненности речных вод [6, 10].

Цель исследования заключалась в рассмотрении пространственно-временной изменчивости переноса химических веществ, химического состава и качества воды в бассейне р. Тузлов в качестве индикатора антропогенного воздействия на территорию Восточного Донбасса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения исследования были использованы гидрохимические данные, полученные с пунктов наблюдений, расположенных поблизости от с. Несветай и г. Новочеркасск (выше и ниже города). Материалами настоящего исследования послужили первичная гидрохимическая информация государственной наблюдательной сети Росгидромета, а также гидрологическая информация из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов и базы данных водного режима рек Европейской территории России.

Был проведен расчет поверхностного гидрохимического стока (за 2003–2019 гг.) в пункте наблюдений с. Несветай для следующих химических компонентов: главных ионов (по сумме), биогенных элементов (кремния, фосфора фосфатов, аммонийного и нитритного азота), металлов (соединений железа общего, цинка и меди). Расчет переноса растворенных веществ проводился по данным пункта наблюдений с. Несветай прямым способом по формуле [15]:

$$G = \sum_{i=1}^m W_i \bar{C}_i \quad (1)$$

где G — количество перенесенного вещества за расчетный период, т или тыс. т; m — число интервалов расчетного периода; W_i — объем стока воды за i -й интервал расчетного периода, км³; \bar{C}_i — средняя концентрация вещества за i -й интервал расчетного периода, мг/дм³. При расчете нормативного стока \bar{C}_i — предельно допустимая концентрация определяемого компонента, мг/дм³ [12].

Для химических компонентов с четко выраженными тенденциями переноса рассмотрена многолетняя пространственно-временная изменчивость их концентрации в воде. Также проведена комплексная оценка степени загрязненности воды реки по гидрохимическим показателям для пунктов наблюдений по общепринятому методу [14]. Проведен сравнительный анализ полученных результатов на основе временной и пространственной

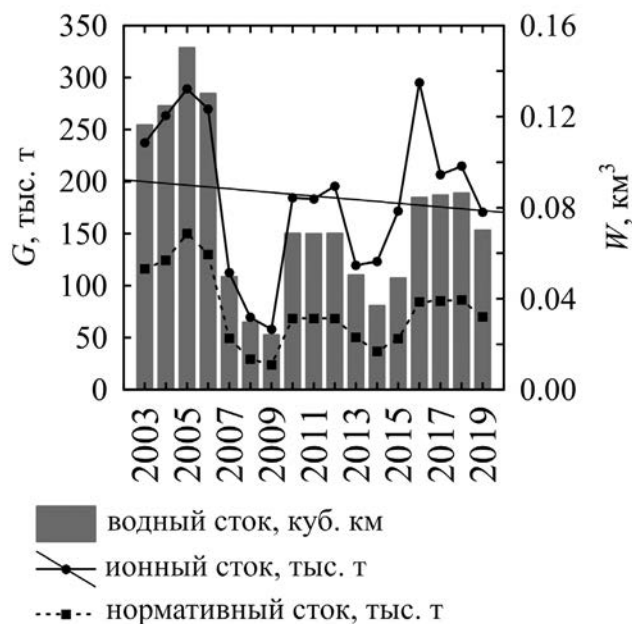


Рис. 2. Динамика переноса главных ионов (по сумме).

изменчивости показателя удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Перенос растворенных веществ в верхнем участке бассейна Тузлова, как видно на рис. 2, в случае **главных ионов** (по сумме) в значительной степени зависел от водности реки. В периоды резкого его увеличения/снижения наблюдалось аналогичное изменение их переноса. Прослеживалось превышение нормативного переноса, что, прежде всего, связано с высоким содержанием в воде реки сульфатов, многократно превышающих уровень ПДК.

Высокое содержание сульфатов в воде р. Тузлов обусловлено их поступлением с техногенными

шахтными водами, дренирующими угленосные отложения, в которых широко распространены сульфидные соединения. В результате их окисления образуются сульфаты, которыми обогащены как техногенные шахтные, так и поверхностные воды бассейна. Многолетними наблюдениями подтверждается увеличение выноса на поверхность сульфатов с шахтными водами в пределах Восточного Донбасса (см. табл. 1) [3, 11].

При рассмотрении временной изменчивости концентрации большинства главных ионов заметно, что их содержание в воде реки несоразмерно изменениям водного стока (табл. 2). В целом для большинства главных ионов было характерно увеличение их содержания в воде.

Наряду с переносом главных ионов, большой интерес представляет перенос **биогенных веществ** так они во многом определяют биологическую продуктивность и рыбохозяйственную значимость водных объектов. Временная изменчивость переноса соединений кремния заметно зависела от водности реки, и за весь наблюдаемый период перенос данного компонента не превышал норму (рис. 3).

Превышений нормативного переноса фосфора фосфатов не наблюдалось (см. рис. 3). Хронологическая изменчивость переноса данного компонента характеризуется отрицательным трендом. Настоящая тенденция объясняется агроистощением почв. По данным [1], в пахотном слое в пределах Приазовской природно-сельскохозяйственной зоны Ростовской области резко сократилось содержание подвижного фосфора в период с 2007 по 2013 г. (рис. 4). Это могло стать ведущим фактором снижения содержания фосфора фосфатного, так как поступление данного компонента в реки происходит преимущественно с поверхностным стоком. По-видимому, это связано с отчуждением фосфора из почвы сельскохозяйственными культурами, которые занимают большую часть водосбора.

Таблица 2. Изменение средних значений объемов годового водного стока (W) и содержания главных ионов (I) в р. Тузлов (с. Несветай)

Период	W , км ³	I , мг/дм ³						
		Катионы			Анионы			ΣI
		Ca	Mg	Na+K	HCO ₃	SO ₄	Cl	
1953–1957 (условный фоновый период)	0.077	136.4	87.72	255.6	332.3	613.2	228.8	1645
2005–2009	<u>0.076*</u> +1.3%	<u>150.7</u> +11%	<u>112.3</u> +28%	–	<u>250.2</u> –24%	<u>1052</u> +71%	<u>265.9</u> +16%	<u>2236</u> +36%
2010–2014	<u>0.066</u> –14%	<u>184.0</u> +34%	<u>129.7</u> +48%	–	<u>270.2</u> –19%	<u>1360</u> +121%	<u>329.9</u> +44%	<u>2788</u> +55%
2015–2019	<u>0.075</u> –2.5%	<u>222.8</u> +63%	<u>128.9</u> +47%	<u>550</u> +115%	<u>306.9</u> –8%	<u>1088</u> +77%	<u>572.5</u> +150%	<u>2869</u> +74%

* В числителе — содержание компонента, в знаменателе — превышение содержания компонента относительно условного фонового периода

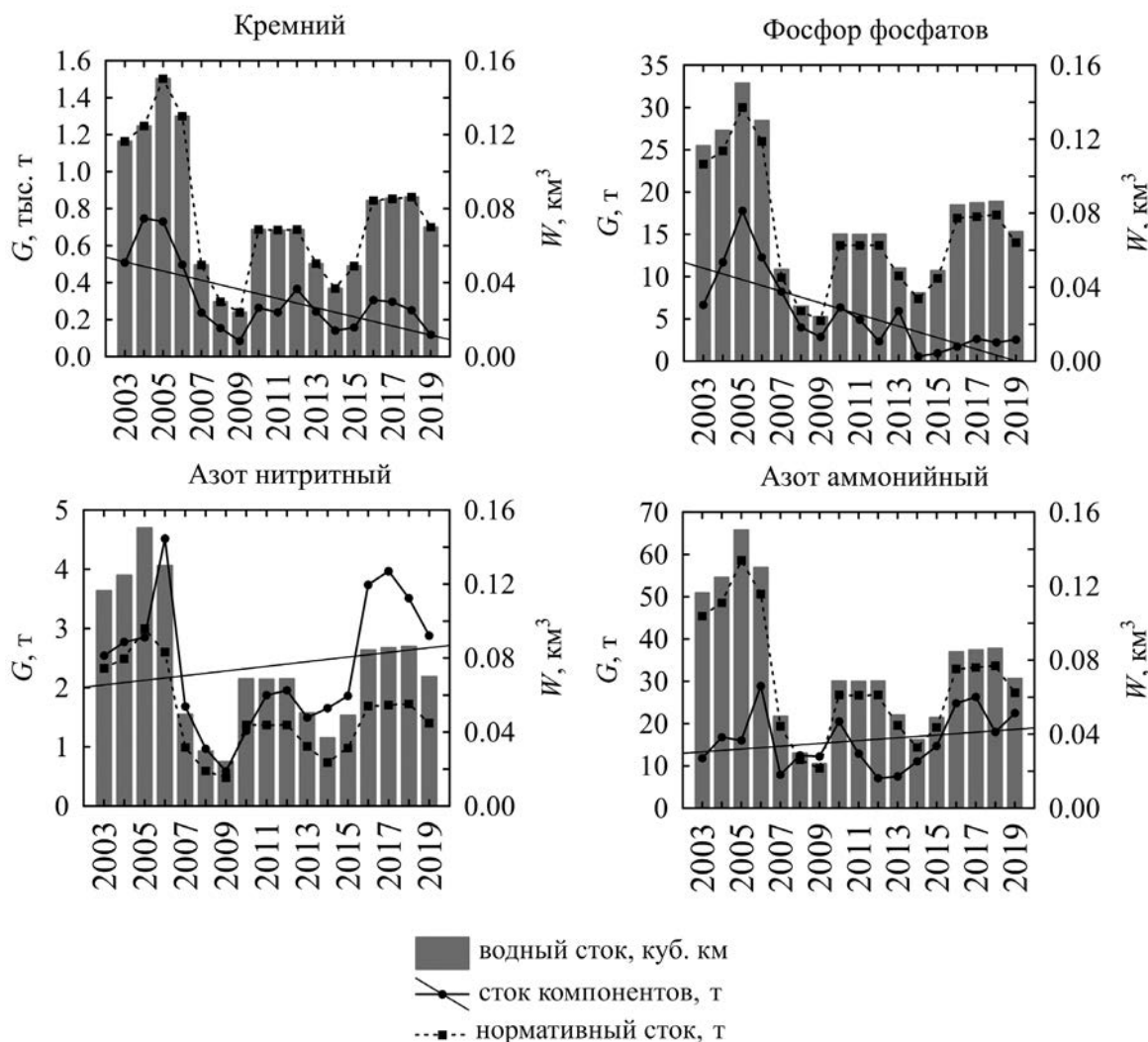


Рис. 3. Динамика стока биогенных веществ.

Аналогичные процессы сокращения содержания фосфора в почвах и, соответственно, в речных системах отмечаются во многих регионах мира, происходят масштабные трансформации его биогеохимического цикла [19, 20].

Особенности изменчивости стока нитритной и аммонийной форм азота. Сток азота аммонийного характеризовался незначительным положительным трендом. В то же время как сток азота нитритного превышал условную норму и характеризовался довольно большим размахом среднегодовых значений концентрации (см. рис. 3). При сравнении изменчивости переноса этих минеральных форм азота с водным стоком можно отметить, что перенос азота нитритного характеризовался более заметной связью с водностью. В воде Тузлова наибольшее содержание нитритов наблюдалось во второй половине летнего периода, что, прежде всего, связано с высокой активностью фитопланктона.

Соединения металлов, в частности железа, меди и цинка, несмотря на сравнительно невысокие их концентрации в воде водных объектов, играют важную роль в метаболических процессах гидробионтов и функционировании речных экосистем. Перенос соединений железа общего характеризовался неустойчивостью: его зависимость от водности не была постоянной в течение рассматриваемого периода. Резкое увеличение переноса данного компонента в 2014 и 2015 г. вплоть до стремительного снижения в 2019 г. вызвано преимущественно возрастанием его концентрации в воде (рис. 5). Даже в условно многогодный период (2003–2006 гг.) перенос был заметно ниже.

Наблюдаемое явление, прежде всего, обусловлено антропогенными факторами, ведущая роль природных источников в таком резком увеличении и последующем сокращении переноса соединений железа общего исчезающе мала. Вероятнее всего, увеличение содержания данного компонента в воде

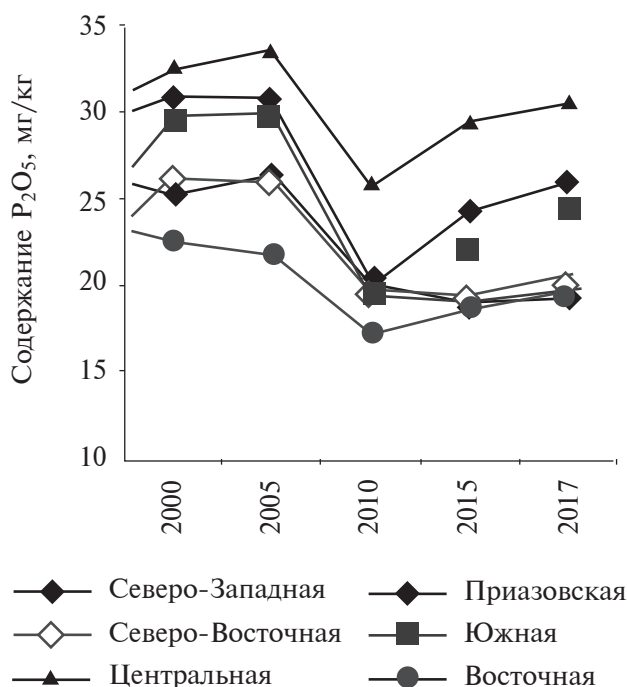


Рис. 4. Динамика содержания подвижного фосфора в пахотном слое почв в природно-сельскохозяйственных зонах Ростовской обл. [1, с изменениями].

связано с его выносом с техногенными шахтными водами.

Зависимость переноса от водности реки была незначительной также для соединений меди и цинка (см. рис. 5). Резкое сокращение переноса было характерно для обоих микроэлементов и в последние годы едва достигало пределов определения используемых методик химического анализа. Уменьшение содержания в воде соединений меди и цинка отмечается и на территории других близкорасположенных бассейнов рек: Миус, Егорлык, Западный Маныч и Сал. Также ранее отмечено довольно низкое содержание относительно фона подвижных форм меди в донных отложениях и поверхностных горизонтах пахотных почв районов, расположенных на территории бассейна

Тузлова [2, 16–18]. Как известно, данные соединения поступают в водные объекты преимущественно с поверхностным стоком [5]. Роль диффузного (площадного) поступления соединений меди и цинка является преобладающей. В ранее проведенных исследованиях было показано, что для этих металлов характерна высокая степень биологической миграции в пределах Ростовской области, что приводит к их интенсивному отчуждению из почвы сельскохозяйственными культурами (табл. 3).

Большие площади посевов сельскохозяйственных культур на водосборе Тузлова создают нестабильность почвенно-геохимической обстановки, в результате чего происходит обеднение почв данными компонентами.

Таким образом, в верхней части бассейна Тузлова под влиянием хозяйственной деятельности увеличился перенос главных ионов (по сумме), а также возросла доля сульфат-ионов в структуре стока. Сокращался сток фосфатов, соединений меди и цинка, что, прежде всего, вызвано отрицательным балансом данных компонентов в почвенном покрове. Перенос соединений железа общего был неустойчив и, вероятно, в наибольшей степени зависел от поступления с шахтными водами. В целом, несмотря на относительно невысокий уровень урбанизации верхней части бассейна р. Тузлов, отмечено воздействие хозяйственной деятельности на характер временной изменчивости переноса отдельных растворенных веществ.

Однако антропогенная нагрузка на водосборе Тузлова распределена неравномерно. Вниз по течению увеличивается интенсивность воздействия уже вышеописанных факторов, резко возрастает роль урбанизированных ландшафтов и наиболее крупных притоков. Суммарное население крупных городов Шахты, Новшахтинск и Новочеркасск составляет более полумиллиона человек, что обуславливает большие объемы водопотребления и, соответственно, водоотведения сточных вод.

В этой связи верхний участок бассейна Тузлова — пункт наблюдений с. Несветай — можно считать условно фоновым, так как сравнительно

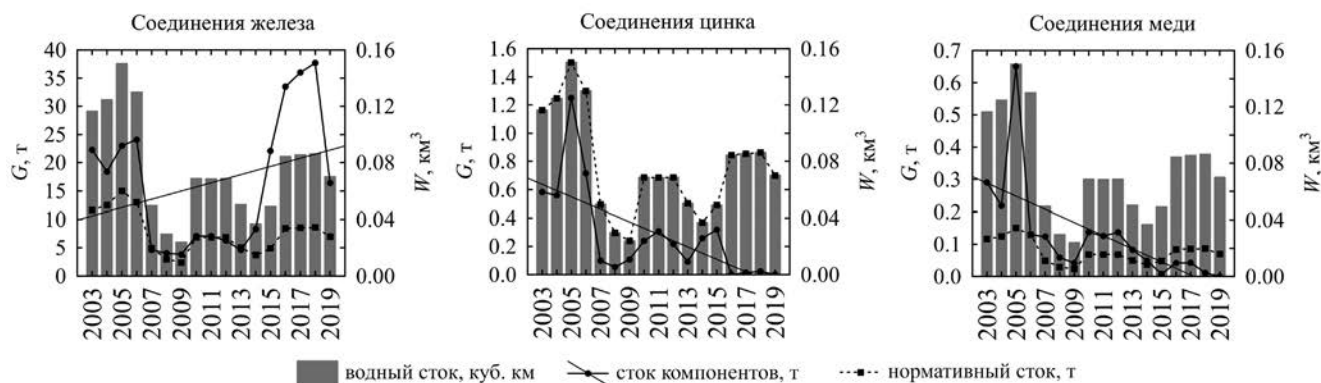


Рис. 5. Динамика переноса соединений металлов.

Таблица 3. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) сельскохозяйственными культурами Cu и Zn в Ростовской области [8]

Культура	Химический элемент	
	Cu	Zn
Озимая пшеница	7.53	12.4
Ячмень	3.83	7.53
Рожь	3.54	8.53
Горох	6.87	12.4
Люцерна	3.16	3.53
Суданская трава	3.33	3.70
Эспарцет	2.96	4.20

Примечание. КБП > 1 свидетельствует о сильном биологическом накоплении химических элементов.

с нижележащей частью бассейна на него оказываются небольшая антропогенная нагрузка.

Проследить перенос растворенных веществ в нижней части бассейна реки не представлялось возможным по причине отсутствия наблюдений за расходами воды. Тем не менее можно рассмотреть изменчивость химического состава воды, которая представлена в табл. 4.

При оценке изменчивости содержания веществ в отдельном пункте наблюдений условно фоновым будет тот пункт, что находится выше по течению реки.

Сравнение гидрохимических данных в пунктах наблюдений **с. Несветай и г. Новочеркасск (выше города)** позволяет оценить вклад наиболее крупных притоков Тузлова в загрязнение воды на данном участке, протяженность которого составляет порядка 58 км. Обобщенные данные о пространственной изменчивости химического состава воды в этой части бассейна свидетельствуют о том, что за период 2000–2014 гг. вниз по течению реки происходило увеличение концентрации в воде суммы главных ионов (12–14%), сульфатов

(12–24%) и соединений железа общего (32–57%). В 2015–2019 гг., напротив, наблюдалось сокращение содержания данных веществ (7–15%). Это может быть связано с уменьшением поступления этих компонентов с водами притоков Тузлова. Содержание фосфора фосфатов вниз по течению увеличивалось в наибольшей степени (74–177%) в 2005–2019 гг.

Обратная ситуация характерна для соединений меди — снижение концентрации (20–56%), соединений цинка — преимущественно снижение концентрации на 17–20%, которое стабилизировалось в 2015–2019 гг в результате увеличения содержания на 17% в сравнении с пунктом в с. Несветай.

Несмотря на то, что на данном участке проявляются все вышеперечисленные антропогенные факторы, роль шахтных вод совершенно очевидна, что подтверждается весьма симпатными геохимическими спектрами техногенных шахтных и речных вод в пределах бассейна (рис. 6).

Несмотря на высокое антропогенное давление, которое значительно усиливается ниже по течению, сокращение концентрации соединений меди и цинка сохраняется, что может говорить о низком содержании данных металлов в компонентах ландшафта. Концентрация фосфора фосфатов, напротив, возрастает, что, по всей видимости, обусловлено поступлением его в речную сеть со сточными водами городов и других населенных пунктов.

Рассмотрим воздействие крупного города на химический состав воды р. Тузлов. Сравняя данные створов гидрохимических наблюдений **выше и ниже г. Новочеркасск** можно выделить, прежде всего, воздействие неконтролируемого поверхностного склонового стока с урбанизированной территории водосбора и сточных вод. Роль других факторов будет в данном случае малозначительной.

Наименьшее разнонаправленное воздействие городской среды отмечается для пространственной изменчивости содержания в воде главных ионов

Таблица 4. Пространственно-временная изменчивость концентрации растворенных в воде веществ в бассейне реки Тузлов (точки наблюдений: 1 — с. Несветай, 2 — выше г. Новочеркасск, 3 — ниже г. Новочеркасск)

Период	2000–2004			2005–2009			2010–2014			2015–2019		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Главные ионы (по сумме), мг/дм	2067	2324	2415	2236	2542	2730	2787	3120	3252	2869	2682	2777
Сульфаты, мг/дм	895	1113	1132	1052	1250	1358	1360	1521	1511	1088	929	912
Соединения железа, мг/дм	0.165	0.218	0.275	0.140	0.220	0.208	0.123	0.171	0.185	0.388	0.336	0.364
Фосфор фосфатов, мг/дм	0.065	0.068	0.05	0.131	0.280	0.301	0.066	0.115	0.151	0.027	0.075	0.127
Соединения меди, мкг/дм	2.5	2.0	2.5	2.21	0.958	1.83	1.76	1.27	2.13	0.260	0.200	0.650
Соединения цинка, мкг/дм	4.66	3.84	4.67	3.82	3.17	4.12	4.00	3.23	5.26	1.38	1.62	1.96

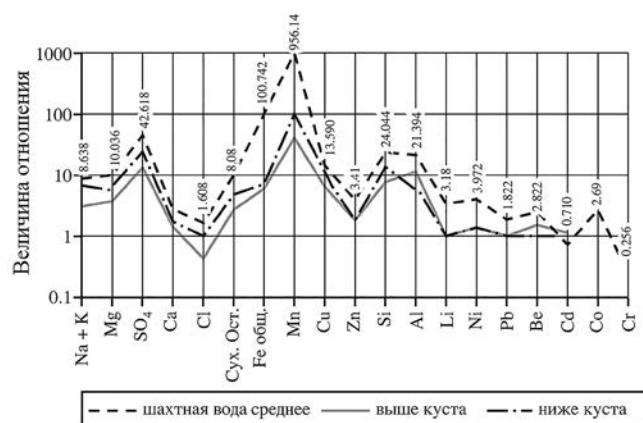


Рис. 6. Геохимические спектры воды рек и шахтных вод бассейна Тузлова (“куст” — скопление объектов угледобывающей промышленности) [4].

(по сумме) и сульфатов (до 9%). Значительное увеличение содержания соединений железа общего в воде (+26%) между створами наблюдалось в 2000–2004 гг., но потом резко сократилось в 2005–2019 гг. до 5–8%, сохранив разнонаправленный характер.

В значительной степени на урбанизированном участке реки увеличилось содержание фосфора фосфатов (до 69%), соединений цинка (до 63%) и меди (до 225%). Наибольшие отличия концентрации данных компонентов между двумя створами отмечались в 2005–2019 гг.

Опираясь на представленные данные, можно сказать, что в поступлении в речную сеть соединений железа общего и главных ионов наибольшая роль принадлежит, соответственно, загрязненным шахтным водам и поверхностному стоку с территории водосбора. Напротив, сточные воды г. Новочеркасск сильно увеличивают содержание в воде фосфора фосфатов, соединений меди и цинка, компенсируя тем самым тренд сокращения их содержания в вышележащей части бассейна.

Воздействие сбрасываемых сточных вод в бассейн р. Тузлов может иметь неоднозначные последствия. Водообеспечение многих городов и населенных пунктов, расположенных в пределах бассейна, происходит из р. Дон. В речную сеть бассейна

Тузлова сбрасываются сточные воды, забранные из другой реки, в результате чего происходит смешение вод разного химического состава. В связи с этим концентрация некоторых компонентов в бассейне Тузлова будет изменяться разнонаправленно.

В ходе исследования также было рассмотрено качество воды реки по соответствующим пунктам гидрохимических наблюдений (табл. 5).

Как и следовало ожидать, в пункте наблюдений с. Несветай загрязненность воды будет меньше в сравнении теми, что расположены ниже по течению. Стабильно критическим показателем загрязненности являются сульфаты, характеризующиеся наибольшей кратностью превышения ПДК со 100%-й повторяемостью. В целом необходимо отметить, что, несмотря на некоторую пространственно-временную изменчивость, качество воды бассейна сохраняется на уровне 4 класса (степень загрязненности воды — “грязная”).

Результаты ранее проведенных исследований [4] показывают, что УКИЗВ шахтных вод примерно в 2 раза выше, чем поверхностных в бассейне Тузлова (степень загрязненности воды — “экстремально-грязная”). Кроме сульфатов, соединения железа общего характеризовались КПЗ. Из этого можно сделать вывод, что даже небольшое количество загрязненных шахтных вод способно в значительной степени ухудшить качество поверхностных вод в речной сети Тузлова.

Рассмотрение пространственно-временной изменчивости качества воды в бассейне Тузлова подтверждает крайне высокую степень антропогенной нагрузки на водосборную площадь, которая проявляется даже в верхней части бассейна реки.

ВЫВОДЫ

В итоге проведенных исследований представляется возможным сделать несколько основных выводов.

Последствия угледобычи оказывают прямое воздействие на содержание в речных водах Тузлова соединений железа общего и главных ионов. На протяжении рассматриваемого периода происходило засульфачивание воды. От доли загрязненных

Таблица 5. Пространственно-временная изменчивость качества воды в бассейне р. Тузлов

Период	с. Несветай			г. Новочеркасск (выше города)			г. Новочеркасск (ниже города)		
	УКИЗВ	Класс	КПЗ	УКИЗВ	Класс	КПЗ	УКИЗВ	Класс	КПЗ
2000–2004	4.15	4А	SO ₄	4.01	4А	SO ₄	4.69	4А	–
2005–2009	5.64	4Б	SO ₄	5.48	4Б	SO ₄	5.66	4Б	SO ₄ ; NO ₂
2010–2014	5.46	4Б	SO ₄	5.86	4Б	SO ₄	6.14	4Б	SO ₄
2015–2019	5.42	4Б	SO ₄	5.01	4А	SO ₄	5.63	4Б	SO ₄

Примечания. УКИЗВ — удельный комбинаторный индекс загрязненности воды. КПЗ — критический показатель загрязненности.

шахтных вод в питании речной сети будет в наибольшей степени зависеть ее гидрохимический режим.

Результаты интенсивной сельскохозяйственной деятельности на водосборе приводят к сокращению содержания в речной воде фосфора фосфатов, соединений меди и цинка. Снижение содержания данных веществ в воде согласуется с их сокращением в почвенном покрове. Ключевая причина — интенсивное отчуждение этих компонентов сельскохозяйственными культурами.

В пределах урбанизированного участка г. Новочеркасск, напротив, в несколько раз возрастает содержание фосфора фосфатов, соединений меди и цинка.

Качество речной воды не характеризовалось значительной пространственно-временной изменчивостью и оставалось на низком уровне (степенью загрязненности воды — “грязная”), что подтверждает острую экологическую ситуацию в бассейне реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безуглова О. С., Назаренко О. Г., Ильинская И. Н.* Динамика деградации земель в Ростовской области // Аридные экосистемы. 2020. № 2. С. 10–15.
2. *Воробьев Е. В., Усова Е. В., Орехова Ю. В.* Анализ динамики и источников поступления ионов марганца, меди, никеля и алюминия в трансграничную реку Миус в период с 2003 по 2017 годы // Юг России: экология, развитие. 2019. № 1. С. 81–93. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-1-81-93>
3. *Гавришин А. И.* Оценка качества химического состава поверхностных вод в восточном Донбассе // Геоэкология. 2019. № 4. С. 61–67. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019461-67>.
4. *Закруткин В. Е., Иваник В. М., Гибков В. Е.* Эколого-географический анализ рисков реструктуризации угольной промышленности в Восточном Донбассе // Известия РАН. Сер. Географическая. 2010. № 5. С. 94–102.
5. *Иванов В. В.* Экологическая геохимия элементов. Т. 4. М.: Экология, 1995. 416 с.
6. Карта качества поверхностных вод Российской Федерации (официальный сайт Гидрохимического института Росгидромета). URL: <https://gidrohim.com/node/61> (дата обращения 30.01.2023).
7. *Косолапов А. Е., Дандара Н. Т., Шкура В. Н., Клименко О. А. и др.* Река Тузлов. План управления бассейном. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2007. 165 с.
8. *Коханистая Н. В., Шишкина Д. Ю., Закруткин В. Е.* Биогеохимическая характеристика агроландшафтов Ростовской области // Успехи современного естествознания. 2022. № 11. С. 53–60. <https://doi.org/10.17513/use.37928>.
9. *Лурье П. М., Панов В. С.* Река Дон: гидрография и режим стока. Ростов н/Д: Донской издательский дом, 2018. 592 с.
10. *Никаноров А. М., Хоружая Т. А.* Качество воды в водных объектах Юга России со стабильно высоким уровнем химического загрязнения // География и природные ресурсы. 2012. № 2. С. 40–45.
11. *Посохов Е. В.* Сульфатные воды в природе. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 165 с.
12. Приказ Минсельхоза России от 10.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения 24.08.2023).
13. Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / Под ред. Г. Г. Матишова. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2005. 352 с.
14. РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. 2002. 50 с. https://gidrohim.com/normative_docs
15. РД 52.24.748–2010. Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком. 2010. 60 с. https://gidrohim.com/normative_docs
16. *Решетняк О. С., Закруткин В. Е.* Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. Естественные науки. 2016. № 4. С. 102–109.
17. *Стрельцова Н. Б., Бакиев З. Р.* Особенности химического состава донных отложений рр. Грушевка и Тузлов // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса / Под ред. Ю. Ф. Лачуги. Ростов н/Д: ООО “ДГТУ-ПРИНТ”, 2020. С. 176–179.
18. *Юркова Р. Е., Докучаева Л. М.* Эколого-токсикологическая оценка состояния почв Ростовской области по содержанию тяжелых металлов // Экология и водное хозяйство. 2020. № 4. С. 41–51.
19. *Alewell, C., Ringeval, B., Ballabio, C. et al.* Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion // Nature communications. 2020. V. 11. P. 4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>
20. *Kohn J., Zimmer D., Leinweber P.* Is phosphorus really a scarce resource? // International Journal of Environmental Technology and Management. 2018. V. 21(5/6). P. 373–395. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2018.100584>

HYDROCHEMICAL FEATURES OF THE TUZLOV RIVER AS AN INDICATOR OF THE CONSEQUENCES OF INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ACTIVITIES IN EASTERN DONBASS (ROSTOV-ON-DON REGION, RUSSIA)

A. D. Sazonov^{a, b, #}, V. E. Zakrutkin^b

^a*Hydrochemical Institute of Roshydromet, pr. Stachki 198, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

^b*Southern Federal University, Institute of Earth Sciences, Bolshaya Sadovaya ul. 105/42,
Rostov-on-Don, 344006 Russia*

[#]*E-mail: alexei.sazonow2016@ya.ru*

The spatial and temporal variability of solute transport, chemical composition and water quality in the Tuzlov River basin for the period 2003–2019 has been considered. The purpose of this study was to consider the Tuzlov basin as an indicator of the consequences of economic activity in the territory of Eastern Donbass. The results obtained on the transport of dissolved substances in the upper part of the basin showed an increase in the transport of major ions, on the contrary, a decreasing trend in the transport of copper, zinc and phosphorus phosphate compounds. Further, the variability of water chemistry in the middle section of the basin, as well as at the observation sites above and below Novocherkassk was considered. In the middle reaches, the increase in the content of major ions continued, and a sharp increase in the concentration of phosphorus phosphate was recorded. The tendency to reduction of copper and zinc compounds remained the same. Below Novocherkassk — at the closing site of hydrochemical observations — the content of phosphorus phosphates, copper and zinc compounds increased to the greatest extent. Water quality during the period under consideration remained at the level of class 4 (“dirty”), its spatial and temporal variability was insignificant. Based on the results obtained, conclusions were made about the leading role of the consequences of coal mining in the increase in the content of major ions (primarily due to sulfate ions) and total iron compounds in water. At the same time, agricultural activities in the catchment lead to a decrease in the content of copper, zinc and phosphorus phosphate compounds in water. However, at the most urbanized Tuzlov River site in the city of Novocherkassk, the content of these components in water increased significantly. The results of the study may be useful in planning conservation measures in the studied area.

Keywords: *Tuzlov River, transport of substances, chemical composition of water, water quality, Novocherkassk, Lower Don*

REFERENCES

1. Bezuglova, O.S., Nazarenko, O.G., Il'inskaya, I.N. [Land degradation dynamics in Rostov oblast]. *Aridnyye ekosistemy*, 2020, no. 2, pp. 10–15. (in Russian)
2. Vorob'ev, E.V., Usova, E.V., Orekhova, Yu.V. [Analysis of dynamics and sources of manganese, copper, nickel and aluminum ions found in the trans-border Mius River during the period from 2003 to 2017]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2019, no. 1, pp. 81–93. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-1-81-93>. (in Russian)
3. Gavrishin, A.I. [Evaluation of chemical composition quality of surface water in the Eastern Donbass]. *Geokologiya*, 2019, no. 4, pp. 61–67. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019461-67>. (in Russian)
4. Zakrutkin, V.E., Ivanik, V.M., Gibkov, V.E. [Ecological and geographical analysis of risks upon coal industry restructuring in Eastern Donbass]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2010, no. 5, pp. 94–102. (in Russian)
5. Ivanov, V.V. [Environmental geochemistry of the elements. Vol. 4]. Moscow, *Ekologiya* Publ., 1995, 416 p. (in Russian)
6. [Map of surface water quality in the Russian Federation (official website of the Hydrochemical Institute of Roshydromet)]. URL: <https://gidrohim.com/node/61> (date of access: 30/01/2023) (in Russian)
7. Kosolapov, A.E., Dandara, N.T., Shkura, V.N., Klimenko, O.A. et al. [Tuzlov River. Basin management plan]. Novocherkassk, YRG TU (NPI) Publ., 2007, 165 p. (in Russian)
8. Kokhanistaya, N.V., Shishkina, D.Yu., Zakrutkin, V.E. [Biogeochemical characteristics of agricultural landscapes of the Rostov region]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2022, no. 11, pp. 53–60. <https://doi.org/10.17513/use.37928>. (in Russian)
9. Lur'e, P.M., Panov, V.S. [Don River: hydrography and flow regime]. Rostov-on-Don, Donskoi izdatel'skii dom Publ., 2018, 592 p. (in Russian)
10. Nikanorov, A.M., Khoruzhaya, T.A. [Water quality in water bodies with permanently high chemical contamination level in the South of Russia]. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2012, no. 2, pp. 40–45. (in Russian)
11. Posokhov, E.V. [Sulfate water in nature]. Leningrad, *Gidrometeoizdat* Publ., 1972, 165 p. (in Russian)
12. [Order of the Ministry of Agriculture of Russia from 10.12.2016 № 552 “On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards

- of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance”]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (date of access: 24/08/2023) (in Russian)
13. [Problems and prospects for integrated development of mineral resources in Eastern Donbass]. Matishov, G.G. Ed., Rostov-on-Don, YUNTS RAN Publ., 2005, 352 p. (in Russian).
 14. [Guideline document 52.24.643–2002. Method of complex assessment of surface water pollution degree by hydrochemical indicators]. 2002, 50 p. http://mgmtmo.ru/edumat/rd/52.24.643_2002.pdf (in Russian)
 15. [Guideline document 52.24.748–2010. Improved methodology for determining the removal (transport) of pollutants with river runoff]. 2010, 60 p. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746647.pdf> (in Russian)
 16. Reshetnyak, O.S., Zakrutkin, V.E. [Bottom sediments as a source of secondary water pollution by metals (according to the laboratory experiment)]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2016, no. 4. pp. 102–109. (in Russian)
 17. Strel'tsova, N.B., Bakiev, Z.R. [Peculiarities of chemical composition of bottom sediments of the Grushevka and Tuzlov Rivers]. Proc. XIII Int. Conf. dedicated to the 90th anniversary of the DSTU “State and prospects for the development of the agro-industrial complex”. Rostov-on-Don, DGTU-PRINT Publ., 2020, pp. 176–179. (in Russian)
 18. Yurkova, R.E, Dokuchaeva, L.M. [Ecological-toxicological assessment of soil condition in Rostov region by heavy metals content]. *Ekologiya i vodnoe khozyaistvo*, 2020, no. 4, pp. 41–51. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-4-41-51>. (in Russian)
 19. Alewell, C., Ringeval, B., Ballabio, C. et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature communications*, 2020, vol. 11, pp. 4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>
 20. Kohn, J., Zimmer, D., Leinweber, P. Is phosphorus really a scarce resource? *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2018, vol. 21(5/6), pp. 373–395. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2018.100584>

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК504.064.2

**ОЦЕНОЧНОЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ
ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ
ОТХОДОВ (НА ПРИМЕРЕ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ)**

© 2024 г. В. И. Осипов¹, О. Н. Еремина¹*, И. В. Козлякова¹, Ю. А. Мамаев¹,
И. А. Кожевникова¹, Н. Г. Анисимова¹

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

*E-mail: o_eremina@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 13.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

В статье рассмотрены научно-методические основы оценки инженерно-геологических условий платформенных территорий для выбора экологически безопасных мест размещения полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО). На примере Центрального Федерального округа России и его части — Владимирской области, показан алгоритм оценки пригодности геологической среды на основе комплексного учета геологического строения территории, литологического состава грунтовых массивов, гидрогеологических условий, проявления опасных экзогенных процессов. Проведено поэтапное типологическое районирование геологической среды: первый этап — мелкомасштабное, для предварительной оценки грунтовых условий крупных регионов на федеральном уровне; второй — среднемасштабное, для комплексной оценки территории по совокупности природных условий и предварительного выделения благоприятных областей на региональном уровне; третий — крупномасштабное, для выделения и сравнительной оценки конкретных участков возможного размещения площадок захоронения ТКО на основании балльной оценки факторов. Для каждого выделенного типа грунтовых условий определены дополнительные инженерные защитные мероприятия при обустройстве полигонов ТКО.

Ключевые слова: *твердые коммунальные отходы, инженерно-геологическое районирование, геологические условия, ТКО, опасные природные процессы, выбор участков*

DOI: 10.31857/S0869780924010099, **EDN:** GNIEXG

ВВЕДЕНИЕ. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Экологически безопасное обращение с отходами и обустройство надежных полигонов ТКО в геологической среде относится к одной из важнейших задач практически во всех странах мира. Общепризнанная концептуальная основа безопасного захоронения отходов в геологической среде — создание “многобарьерной изоляции” [9, 10, 14]. Суть ее заключается в применении как природных (геологических), так и инженерных (искусственных) барьеров. При захоронении ТКО природные геологические барьеры играют важную роль, так как они изолируют отходы от биосферы на многие десятки лет до полного их разложения. От эффективности работы геологических барьеров зависит необходимость и масштаб применения инженерных барьеров, что существенно влияет на стоимость сооружения безопасных полигонов ТКО. Эффективность геологических барьеров для изоляции ТКО зависит от всего комплекса инженерно-геологических условий территории,

всесторонний адекватный учет которых требует разработки специальной методологической базы для поиска подходящих участков геологической среды.

Поиск благоприятных локаций для безопасного размещения ТКО — ответственная научная задача, при решении которой должен учитываться комплекс факторов, влияющих на выполнение экологических, социальных и экономических требований. Несмотря на то что проблема поиска площадок безопасного размещения ТКО остро стоит во всем мире, исследователи в своих публикациях нечасто обращаются к учету природных, в том числе геологических, условий для оценки территорий по пригодности для их размещения [5, 16, 17, 20–22]. При этом важнейшей процедурой при выборе площадок размещения объектов ТКО является районирование, заключающееся в разделении изучаемой территории на участки по признакам пригодности природных условий для размещения таких объектов [5, 11, 14, 15, 18]. Наличие карт районирования позволяет научно обоснованно принимать

управленческие решения по размещению объектов ТКО при планировании рационального использования территорий.

Районирование территорий для выбора площадок размещения объектов ТКО проводится на основе оценки изолирующих и других свойств геологической среды, создающих природные (геологические) барьеры, что способствует снижению загрязнения территории, распространению вредных образований в атмосфере, ландшафтах, подземных водах, почвах и горных породах.

Цель настоящих исследований — на примере территории Центрального Федерального округа (ЦФО) России и одной из ее административных частей (Владимирской области), разработать научно-методический подход к поэтапному районированию платформенных территорий по степени пригодности и безопасности размещения объектов ТКО на основе всестороннего изучения природных условий и их экспертной оценки с последующим отражением на картах районирования.

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ (ОБЗОРНОЕ) РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ЦФО ПО БЛАГОПРИЯТНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

На первом этапе работ районирование территорий по степени пригодности инженерно-геологических условий для размещения объектов ТКО производится в мелком масштабе (1:1000 000–1:2500 000) и базируется на изучении литолого-стратиграфических особенностей разреза на данной территории. Типизация выполняется на основе оценки защищенности геологической среды от загрязнения, поступающего с поверхности. Степень защищенности определяется наличием в геологическом разрезе слабопроницаемых толщ четвертичного и дочетвертичного возраста, глубины их залегания, мощностью и выдержанностью по простиранию.

Методологические принципы ранжирования территорий разработаны авторами ранее для платформенных условий Европейской части РФ в пределах ЦФО [1, 7, 8, 19]. Для платформенных условий Русской плиты наличие мощных глинистых толщ в верхней части разреза — это основной критерий оценки благоприятности территории для размещения предприятий складирования и утилизации отходов, так как они препятствуют поступлению загрязнения с поверхности в нижележащие водоносные горизонты. По этим признакам выделено 5 типов районов, ранжированных от благоприятных до весьма неблагоприятных. Обоснование выделения данных категорий и их подробное описание приведено ранее [8, 19]. Здесь отметим лишь, что благоприятными для размещения объектов ТКО названы районы, где в верхней части

разреза залегают слабопроницаемые глинистые породы, а грунтовые воды находятся на глубине более 5 м. Для условий ЦФО водоупорные толщи чаще всего могут быть представлены двумя комплексами пород — четвертичными моренными суглинками, залегающими у поверхности, и юрскими глинами. В таких условиях четвертичный и мезозойский водоносные комплексы оказываются изолированными друг от друга, а геологическая среда защищена от поступающих с поверхности загрязнений. Эти районы могут считаться перспективными для дальнейшего изучения в более крупном масштабе на последующих этапах исследований.

Пропуская три промежуточные градации, остановимся на характеристике последней, весьма неблагоприятной категории территорий. Весьма неблагоприятными признаны территории, где в геологическом строении отмечаются только хорошо проницаемые и водоносные отложения. Геологическая среда здесь не защищена от поступающих с поверхности загрязнений. Для ЦФО России такие участки, как правило, приурочены к современным долинам рек, где аллювиальные отложения залегают непосредственно на карбонатных породах каменноугольной и девонской систем и районам развития палеоген-неогеновых песков и песчаников.

На основе разработанной типизации была построена обзорная схематическая карта инженерно-геологического районирования, дающая общее представление о благоприятности планируемых мест размещения предприятий утилизации отходов на территории ЦФО при оценке защищенности геологической среды от загрязнения [8, 19]. Эта карта позволяет выделить возможные ключевые участки для дальнейших изысканий и дает первоначальное представление об объемах необходимых дополнительных мероприятий по защите геологической среды от загрязнений при строительстве и эксплуатации таких технических систем, как полигоны ТБО. В генерализованном виде (количество выделенных категорий сокращено до трех: благоприятная, потенциально благоприятная, неблагоприятная), эта карта приведена на рис. 1.

СРЕДНЕМАСШТАБНОЕ (РЕГИОНАЛЬНОЕ) ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

На втором этапе исследований проводятся типизация и последующее районирование перспективных территорий в более крупном масштабе с учетом всего комплекса инженерно-геологических условий: геологического строения, гидрогеологических условий и возможного развития опасных экзогенных процессов и явлений. Рассмотрим такую типизацию на примере одной административной части ЦФО — Владимирской области

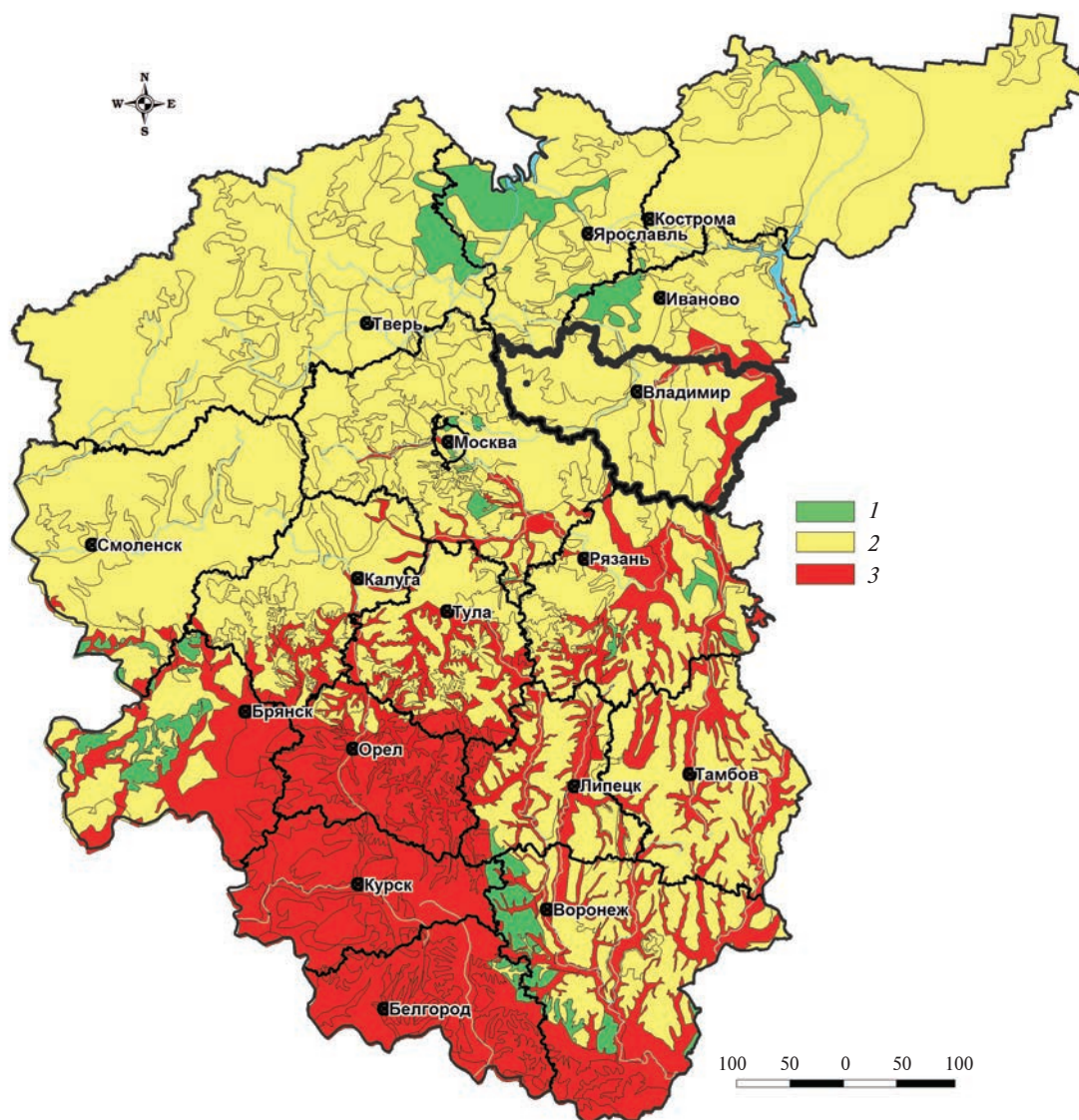


Рис. 1. Положение Владимирской обл. на генерализованной карте мелкомасштабного районирования ЦФО для целей размещения полигонов ТБО. Условные обозначения: 1 — благоприятные, 2 — условно благоприятные, 3 — неблагоприятные.

(см. рис. 1). Выбор данной административной единицы обусловлен несколькими причинами. С геологической точки зрения, территория этого региона, расположенная в пределах Восточно-Европейской платформы, характеризуется типичными для платформенных областей инженерно-геологическими условиями, здесь развит весь спектр природных процессов, свойственных равнинным территориям, что важно для решения задач настоящего исследования. С социально-экономической точки зрения, Владимирская обл. — один из наиболее густонаселенных и экономически развитых регионов ЦФО РФ, расположенный на пересечении транспортных коридоров федерального значения, связывающих столичный регион с восточными частями страны, что обуславливает ее огромное транспортно-логистическое значение. Кроме того,

здесь сосредоточено большое количество древних памятников истории, архитектуры и культуры, в том числе объектов культурного наследия ЮНЕСКО, а также особо охраняемых природных территорий и заказников. Эти обстоятельства предполагают особо тщательный подход к выбору мест расположения полигонов ТБО на основе комплексной оценки всего спектра условий.

С географической точки зрения, территория Владимирской области находится в центре Восточно-Европейской платформы и занимает площадь 29.084 тыс. кв. км [2]. Основная часть территории — слабо всхолмленная равнина с общим понижением от Клинско-Дмитровской гряды (абс. выс. до 271 м) на севере через Владимирское Ополье (абс. выс. до 236 м), далее на юг к Мещёрской низменности (преобладающая абс. выс. 120 м) и на

восток через Окско-Цнинский вал (абс. выс. до 184 м) и Гороховецкий отрог (верхняя точка 191 м) к Балахнинской низменности (около 90 м) и устью р. Клязьма (67 м). Главные реки области: Клязьма и Ока. Кроме них по территории протекают сотни больших и малых рек, их количество вместе с ручьями доходит до 560. Реки имеют равнинный характер течения, широкие долины и меандрирующие русла. Насчитывается около 300 озер, многие из которых имеют ледниковое, пойменное и старичное в долинах Оки и Клязьмы) происхождение, на востоке встречаются карстовые озера.

В геологическом отношении Владимирская обл. входит в пределы восточной части Московской синеклизы. В восточной части области субмеридионально протягивается Окско-Цнинский вал, проявленный в каменноугольных отложениях платформенного чехла, представленных преимущественно карбонатными породами. На территории Владимирской обл. повсеместно распространены четвертичные ледниковые, водно-ледниковые, эолово-делювиальные, озерно-речные и болотные отложения, перекрывающие более древние каменноугольные, пермские, триасовые, юрские, меловые и палеоген-неогеновые отложения платформенного чехла.

Подземные воды на значительных участках Мещерской низменности, в поймах крупных рек залегают на глубинах < 2 м от поверхности. Обширные территории, особенно на юге и юго-востоке области подтоплены и заболочены. Основные экзогенные геологические процессы, которые необходимо учитывать при выборе мест захоронения ТКО: подтопление, заболочивание, затопление пойм рек в половодья, русловая и пойменная эрозия, оврагообразование, оползни на берегах рек, переработка берегов, сульфатный и карбонатный карст [2, 6].

Оценка грунтовых условий Владимирской обл. в целях размещения объектов ТКО аналогична методике мелкомасштабного картирования и выполнялась на основе типизации грунтовых толщ в зависимости от наличия в разрезе до глубины 50 м дочетвертичных и четвертичных комплексов пород пониженной проницаемости, способных защитить геологическую среду от загрязнения, поступающего с поверхности. Типы грунтовых массивов для заданных целей районирования получены из сочетания выделенных комплексов дочетвертичных и четвертичных отложений (табл. 1).

Среди дочетвертичных отложений выделены: слабопроницаемые глинистые толщи юрского возраста; алевролиты-аргиллитовые загипсованные породы и гипсы пермского и триасового возраста; хорошо проницаемые пески и песчаники неогенового, палеогенового и мелового возраста, а также терригенно-карбонатные породы девона и карбона. При подразделении четвертичных толщ учитывалось наличие и положение в разрезе слабопроницаемых суглинков различных генетических типов. Основной слабопроницаемый комплекс пород среди четвертичных образований представлен моренными суглинками. Выделены территории, где эти суглинки залегают с поверхности и под аллювиальными и водно-ледниковыми песками, а также территории, где покровные суглинки и супеси, местами слабодоносные или неравномерно обводненные, имеют значительное распространение и мощность.

В соответствии с этой типизацией составлена карта-схема районирования области по благоприятности размещения полигонов ТКО (рис. 2). На схематической карте видно распределение благоприятных, условно благоприятных и неблагоприятных районов по геологическому строению на территории Владимирской обл.

Таблица 1. Типизация грунтовых толщ, встречающихся на территории Владимирской обл., по благоприятности для размещения ТКО

Дочетвертичные отложения \ Четвертичные отложения		Пески, переслаивание песков и моренных суглинков	Пески	Моренные суглинки, переслаивание песков и суглинков
		1	2	3
I	Преимущественно пески и песчаники (К, Pg, N) водоносные	Неблагоприятные (I-1)	Неблагоприятные (I-2)	Условно благоприятные (I-3)
II	Преимущественно глины (J) водоупорные	Благоприятные (II-1)	Не встречаются	Не встречаются
III	Аргиллиты, алевролиты, песчаники, местами загипсованные, гипс (P-T) слабодоносные и неравномерно обводненные	Благоприятные (III-1)	Условно благоприятные (III-2)	Не встречаются
IV	Известняки, доломиты с прослоями глин (D-C) водоносные	Условно благоприятные (IV-1)	Неблагоприятные (IV-2)	Условно благоприятные (IV-3)

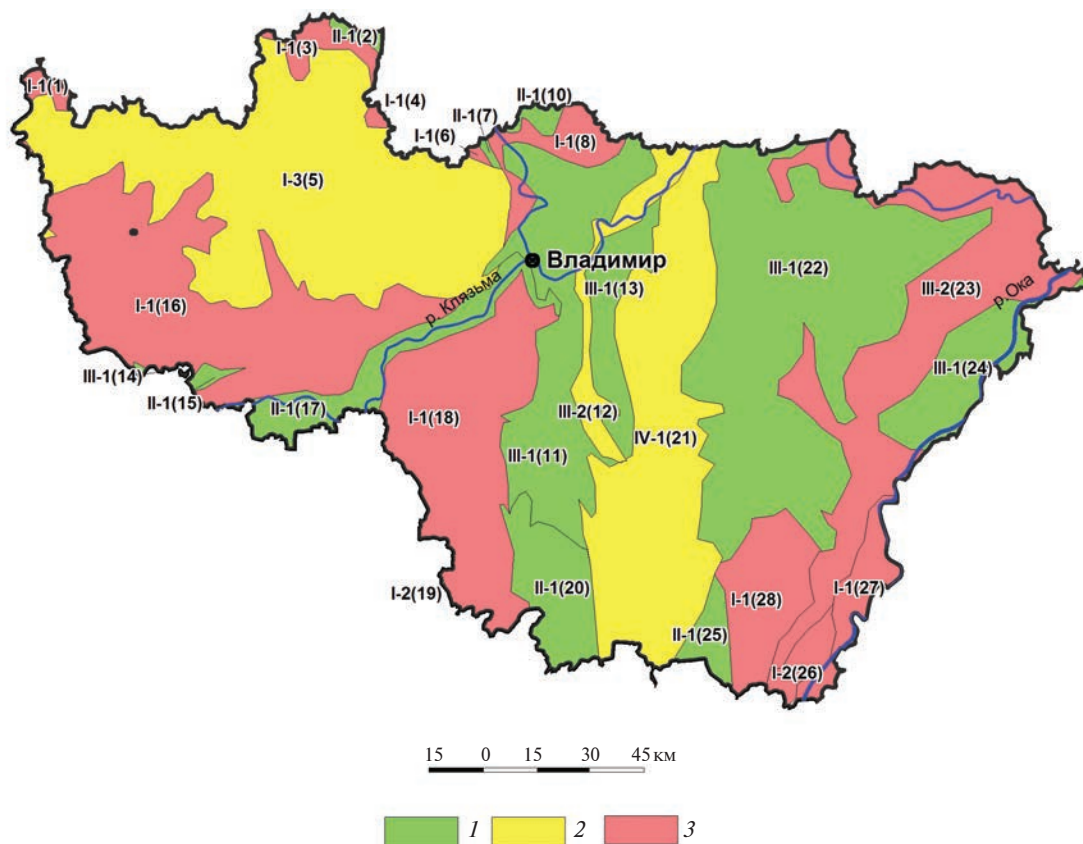


Рис. 2. Карта-схема благоприятности территории Владимирской обл. для размещения ТКО по грунтовым условиям. Условные обозначения: 1 — благоприятные, 2 — условно благоприятные, 3 — неблагоприятные. Цифры в скобках — номера районов.

К условно благоприятным отнесены территории, — в пределах которых достаточно мощные толщи слабопроницаемых пород встречаются только среди четвертичных или только среди дочетвертичных комплексов, представленных хорошо проницаемыми и водоносными песками и песчаниками мелового, палеогенового и неогенового возраста; они широко распространены на северо-западе области в пределах Владимирского Опожья;

— сложенные слабоводоносными и неравномерно обводненными алевритами, аргиллитами и песчаниками пермского и триасового возраста, перекрытые четвертичными песками; этот тип геологического строения встречен в долине р. Ока и некоторых других рек.

Грунтовые условия, в пределах которых четвертичные суглинки и суглинки с прослоями песков залегают непосредственно на девонских и каменноугольных известняках, выделены в пределах Окско-Цнинского вала в центральной части области.

На этом же этапе районирования для более детального анализа природных условий был проведен укрупненный анализ территории области по

основным геоморфологическим, гидрогеологическим и геодинамическим признакам. Было выделено 28 районов, каждый из которых оценен по трем факторам: грунтовые условия, уровень залегания первого от поверхности горизонта подземных вод и опасные природные процессы.

Анализ первого фактора — геологического строения массива грунта, позволяет оценить изолирующие свойства пород и их способность играть роль природных геологических барьеров, препятствующих распространению загрязнений. На основе второго фактора (гидрогеологические условия) оценивается объективная возможность контакта предполагаемого проектируемого объекта ТКО с подземными водами. Третий фактор отражает вероятность нарушения экологической безопасности объектов ТКО в результате развития опасных природных процессов; в рассматриваемых платформенных условиях к ним относятся: затопление, подтопление, заболачивание, эрозия, оврагообразование, карстово-суффозионные процессы и оползни. Оценка вклада указанных факторов в итоговый показатель пригодности инженерно-геологических массивов для размещения объектов ТКО производится на балльной основе. Для каждого фактора

Таблица 2. Шкала баллов для оценки грунтовых и гидрогеологических условий, а также природных процессов на участках размещения объектов ТКО при региональном (среднемасштабном) районировании

Факторы районирования		Баллы
Категория благоприятности грунтовых условий	Благоприятные	90
	Условно благоприятные	60
	Неблагоприятные	20
Глубина залегания УПВ	Отсутствие подземных вод в зоне объекта ТКО (> 10 м)	+10
	УПВ в зоне объекта ТКО, но ниже основного геологического барьера (> 5 м)	0
	УПВ выше основного геологического барьера (< 5 м)	-10
Природный процесс	Затопление поймы паводковыми водами	-30
	Подтопление, заболачивание	-30
	Русловая и пойменная эрозия, оврагообразование	-10
	Склоновые процессы	-10
	Карст	-5

составлена шкала баллов, позволяющая учитывать его значимость (вес) при расчете критерия оценки. Балльная шкала разработана на основе экспертных оценок составителей карты (табл. 2–5).

Строение грунтового массива представляет собой решающий фактор обеспечения безопасности объекта ТКО за счет формирования геологического барьера, препятствующего распространению загрязнения. Оценивая максимальную интегральную величину защитных свойств геологической среды в 100 баллов, примем условно, что вклад фактора геологического строения в эту величину может достигать 90 баллов (табл. 2).

Гидрогеологические условия, обуславливающие возможный контакт объекта ТКО с грунтовыми водами и распространение загрязняющих веществ в геологической среде, для задач, решаемых в настоящем исследовании, были формализованы по глубине залегания грунтовых вод. В зависимости от наличия водоносного горизонта в среде, вмещающей объект ТКО, и расположения УПВ (выше или ниже главного геологического барьера — толщи глинистых пород, являющейся основанием полигона), выделены 3 категории. Каждой категории присвоены соответствующие понижающие или повышающие баллы по отношению к баллам, присвоенным данному участку по грунтовым условиям (см. табл. 2).

Исходя из геоморфологического положения участков, оценивалась возможность проявления: заболачивания, подтопления, затопления поймы паводковыми водами, русловой и пойменной эрозии, овраго- и оползнеобразования. С учетом литологического состава пород и строения геологического разреза, а также имеющихся сведений о наличии карстово-суффозионных провалов, оценивалась возможность развития сульфатного и карбонатного карста [2, 4, 6]. Все эти позиции также выражались в понижающих баллах, присваиваемых участку (см. табл. 2). Значения баллов назначались на основании общих сведений о площади, подверженной развитию того или иного процесса, его интенсивности

(разрушительной силы) и повторяемости. В случае развития на одном участке нескольких опасных процессов баллы либо суммировались, либо участку присваивался балл по наиболее опасному процессу, исходя из общих экспертных оценок.

При расчете суммарного балла и назначении итоговой категории пригодности участка принималось во внимание, что такие процессы, как подтопление и заболачивание территории, также учтены при расчете гидрогеологического фактора (глубина залегания УПВ < 5 м), а области возможного развития карстово-суффозионных процессов приурочены к распространению карбонатных и сульфатных массивов, которые учтены при расчете фактора благоприятности по грунтовым условиям. Отрицательные значения интегрального балла, как не имеющие физического смысла, приравнивались к нулю. Приняты следующие условные интервалы суммарных баллов, определяющие итоговую оценку пригодности территории для размещения ТКО по комплексу природных условий (табл. 3).

На основании разработанной методики произведена оценка пригодности природных условий Владимирской обл. (табл. 4). Выделенные районы нанесены на итоговую карту районирования (рис. 3).

Из анализа построенной схематической карты видно, что идеальные условия для размещения отходов (100 баллов) отсутствуют в изученном

Таблица 3. Шкала суммарных баллов для оценки пригодности территорий для размещения объектов ТКО при региональном (среднемасштабном) районировании

Категория природных условий	Интервал суммарных баллов
Пригодные (П)	80–100
Условно пригодные (УП)	50–80
Условно непригодные (УН)	20–50
Непригодные (Н)	< 20

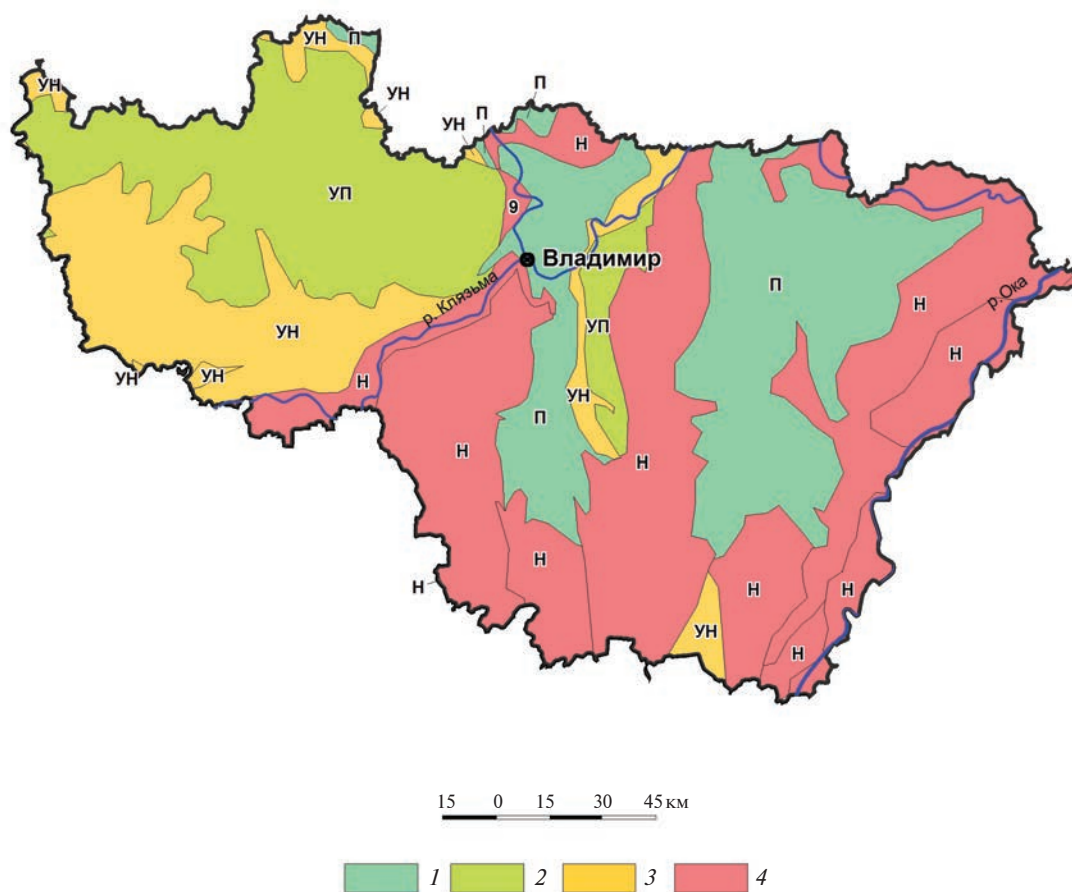


Рис. 3. Карта-схема пригодности природных условий Владимирской обл. для размещения объектов ТКО. 1 — пригодные; 2 — условно пригодные; 3 — условно непригодные; 4 — непригодные. Буквенные индексы на карте соответствуют обозначениям комплексного индекса пригодности территорий в табл. 4.

регионе. При этом почти половина территории области относится к категории непригодных и условно непригодных условий для размещения ТКО. Непригодные области в основном приурочены к заболоченным и подтопленным местам с высоким положением УПВ, пойменным частям долин Клязьмы, Оки и их притоков. Обращает внимание, что наличие в разрезе глинистых водоупоров хоть и делает участок благоприятным с точки зрения строения геологического разреза, однако, при этом зачастую способствует развитию заболачивания и подтопления, что существенно понижает общую категорию пригодности территории. Субмеридиональная полоса Окско-Цнинского вала, к которой приурочено неглубокое залегание карстующихся карбонатных пород, также попадает в непригодную категорию для размещения объектов ТКО. Наиболее пригодными по природным условиям представляются равнинные увалистые плато Владимирского ополя на северо-востоке и в центральной части области, характеризующиеся присутствием моренных суглинков в литологическом разрезе, глубоким положением УПВ и незначительным развитием опасных природных процессов.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МАССИВОВ ПО СТЕПЕНИ ИХ ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТКО

На третьем этапе картографических работ в границах пригодных по комплексу природных условий районов в более крупном масштабе (1:25000—1:10000) выделяются ключевые инженерно-геологические участки (массивы), и проводится их более детальное сравнение по вышеперечисленным трем основным факторам: литологическому составу пород и их свойствам, гидрогеологическим условиям и развитию опасных природных процессов. В отличие от предыдущего этапа, на этапе детальных исследований балльная оценка дается не только по наличию или отсутствию фактора, но и по атрибутивным характеристикам данного фактора. Так, должны быть изучены и оценены в баллах не только состав, но и свойства пород, слагающих вмещающий массив будущего полигона ТКО, не только глубина УПВ, но и химический состав подземных вод, а проявление опасных экзогенных процессов

Таблица 4. Комплексная оценка пригодности территорий по природным условиям для размещения ТКО

№ района	Индекс по грунтовым условиям	Категория благоприятности по грунтовым условиям	Балл по грунтовым условиям	Глубина залегания УПВ, м	Балл по УПВ	Опасные процессы	Балл по процессам	Общий балл	Общая категория пригодности
1	I-1	Н	30	> 10	+10	Нет	0	40	УН
2	III-1	Б	90	> 5	0	Русловая и пойменная эрозия	-10	80	П
3	I-1	Н	30	> 10	+10	Нет	0	40	УН
4	I-1	Н	30	> 10	+10	Нет	0	40	УН
5	I-3	УБ	60	> 10	+10	Русловая и пойменная эрозия, локально оврагообразование	-20	50	УП
6	I-1	Н	30	>10	+10	Нет	0	40	УН
7	III-1	Б	60	> 5	0	Русловая и пойменная эрозия	-10	50	УП
8	I-1	Н	30	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	10	Н
9	I-1	Н	30	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	10	Н
10	III-1	Б	90	> 5	0	Нет	0	90	П
11	IV-1	Б	90	>10	+10	Эрозия, локально оврагообразование	-20	80	П
12	IV-2	УБ	60	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	40	УН
13	IV-1	Б	90	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	70	УП
14	III-1	Б	90	< 5	-10	Затопление, заболачивание	-40	40	УН
15	III-1	Б	90	< 5	-10	Затопление, заболачивание	-40	40	УН
16	I-1	Н	30	> 5	0	Русловая и пойменная эрозия, возможно оврагообразование	-20	10	Н
17	III-1	Б	90	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия, затопление, заболачивание	-70	10	Н
18	I-1	Н	30	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-40	0	Н
19	I-2	Н	30	< 5	-10	Затопление, заболачивание	-40	0	Н
20	III-1	Б	90	< 5	-10	Затопление, заболачивание	-40	40	УН
21	V-1	УБ	60	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-40	10	Н
22	IV-1	Б	90	> 10	+10	Эрозия, локально оврагообразование;	-20	80	П
23	IV-2	УБ	60	< 5	-10	Затопление поймы, заболачивание, русловая и пойменная эрозия	-70	0	Н
24	IV-1	Б	90	< 5	-10	Затопление поймы, заболачивание, русловая и пойменная эрозия	-70	20	Н
25	III-1	Б	90	> 5	0	Русловая и пойменная эрозия, возможно оврагообразование	-20	70	УП
26	I-2	Н	30	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-30	0	Н
27	I-1	Н	30	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия	-10	10	Н
28	I-1	Н	30	< 5	-10	Русловая и пойменная эрозия, местами заболачивание	-20	10	Н

Примечание. Индексы благоприятности территории по грунтовым условиям: Б — благоприятные; УБ — условно благоприятные; Н — неблагоприятные; комплексный индекс пригодности территории: П — пригодные; УП — условно пригодные; УН — условно непригодные; Н — непригодные

Таблица 5. Шкала баллов по оценке изолирующих свойств различных литологических типов пород (по [11])

Критерий Тип пород	Фильтрационная способность, K_f , м/сут	Баллы	Удерживающая способность, мг/кг	Баллы
Глины и тяжелые суглинки	$< 5 \times 10^{-5}$	50	> 1000	20
Легкие и средние суглинки	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$	20	500–1000	10
Супеси	$5 \times 10^{-3} - 0.5$	10	100–500	2
Пески и гравий	> 0.5	0	< 100	0

Таблица 6. Шкала баллов для оценки опасных природных процессов на площадке (по [11])

Наименование процесса	Балльная оценка	Повторяемость (за 100 лет)	Баллы
Затопление	–100	0.10	–10
Подтопление	–20	0.20	–4
Эрозия	–10	0.10	–1
Склоновые процессы	–10	0.05	–0.5
Карст	–5	0.01	–0.05

Таблица 7. Типизация грунтовых массивов по степени пригодности для размещения объектов ТКО

Критерии Степень пригодности	Сумма баллов	Строение вмещающего грунтового массива	Гидрогеологические условия	Опасные процессы	Дополнительные инженерные мероприятия
Пригодные	> 80	Вмещающий массив сложен целиком (либо в основании и кровле объекта) слабопроницаемыми глинистыми грунтами. Геологическая среда защищена от загрязнения, поступающего с поверхности	Отсутствует контакт объекта ТКО с подземными водами	Исключено развитие опасных природных процессов	Возможно строительство объектов ТКО с минимальными финансовыми затратами, соблюдением требований экологической безопасности и постоянного экологического мониторинга
Условно пригодные	40–80	Вмещающий массив сложен горными породами, но в основании объекта присутствует толща глин или тяжелых суглинков, которая может служить надежным геологическим барьером	Подземные воды, залегающие в пределах зоны влияния объекта ТКО, находятся ниже его основания. Нельзя исключать контакта с подземными водами при подъеме их уровня	Развитие опасных экзогенных природных процессов не исключено, но их проявления отсутствуют	Необходимо обустройство природно-техногенного барьера с применением методов технической мелиорации по периметру объекта ТКО
Условно непригодные	10–40	Вмещающий массив сложен проницаемыми обводненными породами (супеси, пески); в основании объекта ТКО залегают толщи легких и средних суглинков	Сооружение находится в зоне контакта с подземными водами	Возможно развитие опасных экзогенных природных процессов, есть их единичные проявления	Инженерная подготовка участка для создания объектов обращения с ТКО требует значительных финансовых средств и может проводиться только в исключительных случаях
Непригодные	< 10	Вмещающий массив целиком сложен толщей проницаемых пород	Обводненные и затопляемые паводковыми водами территории	Интенсивное развитие карстовых, суффозионных, оползневых и других опасных процессов	Инженерная подготовка участков требует огромных финансовых затрат на создание искусственных и природно-техногенных барьеров

должно быть конкретизировано с учетом их интенсивности и повторяемости. Подробно методика балльной оценки инженерно-геологических массивов на этом этапе, разработанная В. И. Осиповым, И. В. Козляковой и Ю. А. Мамаевым, описана ранее [11].

При балльной оценке изолирующих свойств пород на этом этапе предлагается учитывать такие характеристики, как коэффициент фильтрации (K_f , м/сут) и удерживающая (поглощающая) способность (мг/г), существенно варьирующие в зависимости от литологического состава пород [12].

Согласно предлагаемой методике, интегральная оценка изолирующей (фильтрационной и удерживающей) способности изучаемого массива осуществляется на основе сложения полученных баллов для каждого литологического типа пород, умноженных на его относительную мощность в разрезе (в долях единицы) [11].

Гидрогеологические условия аналогично предыдущему этапу оцениваются исходя из наличия водоносного горизонта в среде, вмещающей объект ТКО, и взаимодействия подземных вод с ним (см. табл. 3). При дальнейшем совершенствовании методики представляется целесообразным учитывать также химические параметры подземных вод,

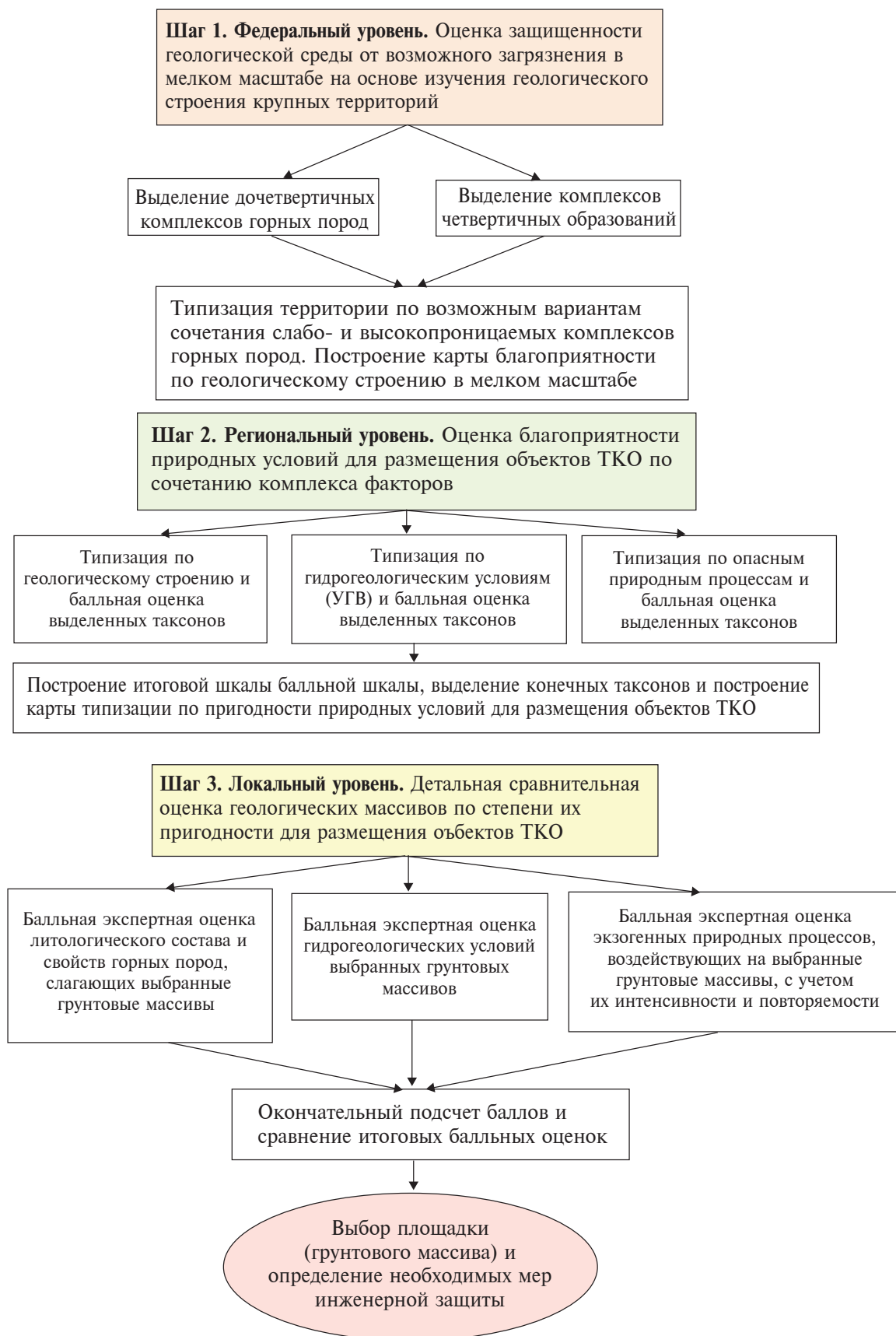


Рис. 4. Блок-схема поэтапной оценки пригодности геологической среды для размещения объектов ТКО.

которые могут оказать влияние как на проявление ряда экзогенных процессов, так и на устойчивость инженерных конструкций [3, 10, 13].

На завершающем этапе крупномасштабной сравнительной оценки массивов выбранных площадок учет опасных природных процессов проводится более детально. Понижающие (отрицательные) баллы присваиваются каждому опасному экзогенному процессу в зависимости от его разрушительной способности. Принимая максимальную отрицательную величину неблагоприятного процесса, равной 100 баллов, на основании экспертных оценок имеем следующие значения: максимальная опасность создается при затоплении в результате наводнений (–100 баллов), далее идут подтопление (–20), эрозия временными и постоянными водотоками (–10), склоновые процессы: оползни, осыпи, солифлюкция и др. (–10), карст (–5). Величина этого показателя зависит не только от разрушительной силы, но и от повторяемости опасного явления на данном участке за весь период существования объекта до полного разложения свалочного тела (100 лет), выраженной в долях единицы. Вклад каждого процесса находится как произведение его опасности (баллы) и повторяемости (дол. ед). В том случае, когда на площадке возможно развитие нескольких опасных процессов находится интегральная величина баллов от всех процессов, что дает возможность получить общую оценку величины рассматриваемого критерия (табл. 6) [11].

В результате анализа всех факторов находится суммарная величина набранных баллов. Получаемый численный показатель является основным критерием подразделения массивов пород на оцениваемых площадках по условиям размещения объектов ТКО (табл. 7). Суммарная величина баллов берется за основу подразделения территории по условиям размещения отходов. Для этого все инженерно-геологические массивы ранжируются по величине баллов на 4 типа, аналогично рассмотренным на предыдущих этапах: пригодные, условно пригодные, условно непригодные и непригодные. Для каждого типа массивов дается диапазон баллов, характеризующий степень его пригодности (см. табл. 7), и делается заключение о возможности сооружения объекта ТКО на данном участке, необходимости обустройства природно-техногенных барьеров с применением методов технической мелиорации по периметру сооружения и дополнительных защитных инженерных мер.

На основе данной типизации возможно построение крупномасштабной карты районирования по условиям пригодности территорий для размещения отходов. Такие карты имеют статус оценочных и предназначены для проектирования конкретных объектов в пределах относительно небольших по площади территорий (отдельные

административные районы или муниципальные образования), составляются в масштабах 1:25000–1:10000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложена методика трехступенчатой оценки геологической среды по ее пригодности для размещения объектов ТКО, которая в наглядной форме может быть представлена в виде следующей блок-схемы (рис. 4).

Предлагаемая методика поэтапной оценки геологической среды по степени ее пригодности для размещения объектов ТКО на основе специального инженерно-геологического районирования представляется важным инструментом учета природных условий для размещения объектов ТКО. Ее применение в сочетании с оценкой социально-экономических параметров на стадии планирования позволяет принять решения по ряду вопросов, а именно:

- научно обосновать выбор участков размещения отходов с учетом природных условий, социально-экологической безопасности и экономической целесообразности;

- осуществлять инвентаризацию мест размещения существующих и ранее сформированных полигонов и свалок ТКО с целью решения вопросов их закрытия, перезахоронения и реабилитации;

- принимать предварительные решения о конструкции будущих объектов обращения с ТКО, объему и содержанию работ по их инженерной подготовке и защите;

- выявлять логистические проблемы, включающие доступность объекта, его оптимальное размещение относительно мест накопления ТКО и расположения перерабатывающих предприятий и другие.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы” и частично в рамках проекта РНФ 22-17-00045 “Научное обоснование безопасного захоронения ТКО в геологической среде”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурова В. Н., Козлякова И. В., Еремина О. Н. Проблемы размещения твердых коммунальных отходов и оценка риска на примере Центрального Федерального округа России // Геоэкология. 2022. № 6. С. 3–16
2. Геология СССР. Т. 4. Центр Европейской части СССР. Геологическое описание. М.: Недра, 1971. 742 с.
3. Гольдберг В. М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1:1000000. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.

5. *Заиканов В. Г., Заиканова И. Н., Булдакова Е. В.* Геоэкологический и ландшафтно-экологический анализ территорий существующих свалок ТБО Московской области // Сергеевские чтения: Вып. 20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. М.: РУДН, 2018. С. 65–73.
6. *Инженерная геология СССР. Т. 1. Русская платформ а/* Под ред. И. С. Комарова. М.: Изд-во МГУ, 1978. 527 с.
7. *Козлякова И. В., Кожевникова И. А., Анисимова Н. Г., Иванов П. В.* Инженерно-геологическое районирование Центрального федерального округа России по условиям размещения предприятий и полигонов утилизации твердых бытовых отходов // Сергеевские чтения. Вып. 20: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. М.: РУДН, 2018. С. 74–76.
8. *Козлякова И. В., Кожевникова И. А., Еремина О. Н., Анисимова Н. Г.* Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО // Геоэкология. 2021. № 1. С. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045>
9. *Осипов В. И.* Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. 2019. № 3. С. 3–11.
10. *Осипов В. И., Галицкая И. В., Заиканов В. Г.* Полигонная технология обращения с отходами // Геоэкология. 2022. № 3. С. 3–15.
11. *Осипов В. И., Козлякова И. В., Мамаев Ю. А.* Территориальное размещение твердых коммунальных отходов // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 6. С. 567–574. <https://doi.org/10.1134/S101933162002015X>.
12. *Осипов В. И., Соколов В. Н.* Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
13. *Экзарьян В. Н.* Геоэкология и охрана окружающей среды. М.: Изд. “Щит-М”, 2009.
14. *Экзарьян В. Н.* Методологические основы районирования территорий для выбора мест размещения полигонов отходов // Сергеевские чтения. Вып. 20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. М.: РУДН, 2018. С. 97–101.
15. *Юганова Т. И.* Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений // Геоэкология. 2019. № 4. С. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93>
16. *Balogun-Adeleye, R. M., Longe, E. O., Aiyesimoju, K. O.* Environmental assessment of municipal solid waste (MSW) disposal options: A case study of Olushosun landfill, Lagos State // 1st Int. Conf. on Sustainable Infrastructural Development IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 640. P. 012091. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012091>
17. *Djokanović, S., Abolmasov, B., Jevremović, D.* GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo, Serbia // Bull. Eng. Geol. Environ., 2016. V. 75. Is. 3. P. 1273–1299. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0888-0>
18. *Ghobadi, M. H., Taheri, M., Taheri, K.* Municipal solid waste landfill siting by using analytical hierarchy process (AHP) and a proposed karst vulnerability index in Ravansar County, west of Iran // Environ Earth Sci. 2017. № 76. P. 68. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6392-4>
19. *Kozliakova, I. V., Kozhevnikova, I. A., Eremina, O. N., Anisimova, N. G.* Engineering geological typification and zoning territory for allocation of municipal solid waste management facilities // PeriodicoTcheQuimica, 2020. V. 17. № 35. P. 1124–1136.
20. *Mondelli, G., Giacheti, H. L., Gimenez Boscov, M. E. et al.* Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil // Environ. Geol., 2007. № 52. P. 871–887. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0529-1>
21. *Phukon, P., Phukan, S., Goswami, R.* Municipal solid waste (MSW) disposal site selection in and around Guwahati city using GIS. Department of Geological Sciences, Gauhati University, Guwahati-781014, 2005.
22. *Schueler A. S., Mahler, C. F.* Classification method for urban solid waste disposal sites // Journal of Environmental Protection. 2011. V. 2. P. 473–481. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.24055>

ESTIMATIVE ENGINEERING GEOLOGICAL ZONING FOR ALLOCATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS (BY THE EXAMPLE OF VLADIMIR REGION, RUSSIA)

V. I. Osipov^a, O. N. Eremina^{a, #}, I. V. Kozliakova^a, Yu. A. Mamaev^a, I. A. Kozhevnikova^a, N. G. Anisimova^a

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

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

The paper describes the scientific and methodological fundamentals for the assessment of engineering geological conditions at platform areas for selection of environmentally friendly sites for allocating municipal solid waste landfills. By the example of Central Federal region of Russia and its part, Vladimir area, the algorithm of assessing the geoenvironment suitability is shown proceeding from the comprehensive consideration of geological structure, lithology of ground massifs, hydrogeology, and geohazards. The typological zoning of geoenvironment is performed in three stages: the first stage

includes the small-scale zoning for the preliminary estimation of ground conditions of large regions at the federal level; the second stage comprises the medium-scale zoning for the comprehensive assessment of the territory according to the complex of natural conditions in order to distinguish favorable areas at a regional level; the third stage stands for the large-scale zoning for outlining and comparison of particular plots for MSW disposal proceeding from the score assessment of factors. For each distinguished type of ground conditions, the additional engineering protective measures for landfill arrangement are assigned.

Keywords: *municipal solid waste, engineering geological zoning, geological conditions, MSW disposal, geohazards, site selection*

REFERENCES

- Burova, V.N., Kozlyakova, I.V., Eremina, O. N. Problems in municipal solid waste disposal and risk assessment by the example of the Central federal region, Russia. *Geoekologiya*, 2022, no. 6, pp. 3–16. (in Russian)
- [Geology of the USSR. Volume 4. Centre of the European part of the USSR. Geological description]. Moscow, Nedra Publ., 1971, 742 p. (in Russian)
- Gol'dberg, V.M. [Interplay between the groundwater and environment pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987, 248 p. (in Russian)
- [State geological map of the Russian Federation, scale 1:1000000]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1999. (in Russian)
- Zaikanov, V.G., Zaikanova, I.N., Buldakova, E.V. [Geoecological and landscape ecological analysis of landfill sites in Moscow oblast]. In: Sergeevskie chteniya, issue 20. Proc. of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 65–73 (in Russian)
- [Engineering geology of the USSR, Volume 1. The Russian Platform.] I. S. Komarov, Ed., Mosk. Univ. Publ., 1978, 527 p. (in Russian)
- Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Anisimova, N.G., Ivanov, P.V. [Engineering geological zoning of the Central federal okrug in Russia by the conditions of placing enterprises and disposal sites of municipal solid waste]. In: Sergeevskie chteniya, issue 20. Proc. of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 74–76. (in Russian)
- Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Eremina O.N., Anisimova, N.G. [Methodological principles of assessing geoenvironment for allocation of municipal solid waste management facilities]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 48–58. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010045> (in Russian)
- Osipov, V.I. [Management of municipal solid wastes as a Federal ecological project]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
- Osipov, V.I., Galitskaya, I.V., Zaikanov, V.G. [Landfill technology of waste management]. *Geoekologiya*, 2022, no.3, pp. 3–15. (in Russian)
- Osipov, V.I., Mamaev, Yu.A., Kozliakova, I.V. Territorial placement of solid municipal waste landfills. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 3, pp. 338–344. <https://doi.org/10.1134/S101933162002015X> (in Russian)
- Osipov, V.I., Sokolov, V.N. [Clays and their properties]. Moscow, Geos Publ., 2013, 576 p. (in Russian)
- Ekzaryan, V.N. [Geoecology and the environment conservation]. Moscow, Shchit-M Publ., 2009. (in Russian)
- Ekzaryan, V.N. [Methodological fundamentals of zoning territories for selecting places for the waste storage sites]. In: Sergeevskie chteniya, issue 20. Proc. of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 97–101. (in Russian)
- Yuganova, T.I. [Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods] *Geoekologiya*, 2019, no. 4, pp. 79–93. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93> (in Russian)
- Balogun-Adeleye, R.M., Longe, E.O., and Aiyesimoju, K.O. Environmental assessment of municipal solid waste (MSW) disposal options: A case study of Olushosun landfill, Lagos State // 1st Int. Conf. on Sustainable Infrastructural Development *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, no. 640, 012091. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/640/1/012091>
- Djokanović, S., Abolmasov, B., Jevremović, D. GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo, Serbia. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, vol. 75, is. 3, pp. 1273–1299. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0888-0>
- Ghobadi, M.H., Taheri, M., Taheri, K. Municipal solid waste landfill siting by using analytical hierarchy process (AHP) and a proposed karst vulnerability index in Ravansar County, west of Iran. *Environ Earth Sci.*, 2017, no. 76, p. 68. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6392-4>
- Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Eremina, O.N., Anisimova, N.G. Engineering geological typification and zoning territory for allocation of municipal solid waste management facilities. *Periodico Tche Quimica*, 2020, vol. 17, no. 35, pp. 1124–1136.
- Mondelli, G., Giacheti, H.L., Gimenez Boscov, M.E. et al. Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. *Environ. Geol.*, 2007, no. 52, pp. 871–887. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0529-1>
- Phukon, P., Phukan, S., Goswami, R. Municipal solid waste (MSW) disposal site selection in and around Guwahati city using GIS. Department of Geological Sciences, Gauhati University, Guwahati-781014, 2005.
- Schueler, A.S., Mahler, C.F. Classification method for urban solid waste disposal sites. *Journal of Environmental Protection*, 2011, vol. 2, pp. 473–481. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.24055>

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.4

ШЛАКИ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ: СОСТАВ, ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, ОБРАБОТКА, ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ДОПУСТИМОСТЬ ЗАХОРОНЕНИЯ

© 2024 г. Т. И. Юганова¹, *, В. С. Путилина¹, **¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: tigryu@gmail.com

**E-mail: vputilina@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 15.09.2023 г.

Рассматривается важнейшая проблема, возникающая при обращении со шлаком от сжигания ТКО, связанная с возможным загрязнением окружающей среды. По литературным данным охарактеризованы состав, химические свойства и минералогия шлака. Рассмотрены вопросы выщелачивания загрязняющих веществ (ЗВ) из шлака, методы тестирования выщелачивания, прогнозное моделирование. Из ЗВ изучены наиболее опасные для окружающей среды — тяжелые металлы (ТМ). Охарактеризована роль гранулометрического и химического состава шлака, pH и растворенного органического углерода в процессах выщелачивания ТМ. Представлены способы обработки шлака для уменьшения воздействия на окружающую среду, возможности использования шлака и нормативные ограничения.

Ключевые слова: шлак от сжигания ТКО, тяжелые металлы, выщелачивание, тестирование выщелачивания, моделирование, обработка шлака, использование шлака

DOI: 10.31857/S0869780924010108, EDN: GNHGQH

ВВЕДЕНИЕ

Сжигание твердых коммунальных отходов (СТКО, MSWI) — распространенный метод их обработки, позволяющий уменьшить массу отходов на 70% и объем до 90%. При этом образуются так называемые твердые остатки (ОСТКО), которые необходимо обрабатывать дополнительно. Производятся два основных типа ОСТКО [15]: донная зола (bottom ash, BA) со шлаком (далее вместе “шлак”¹) и летучая зола (ЛЗ, fly ash, FA). Образование и состав ОСТКО, общие для шлака и ЛЗ вопросы рециклинга, методы оценки токсичности, выщелачивание загрязняющих веществ (ЗВ) и проблемы его тестирования, способы обработки ОСТКО для уменьшения воздействия на окружающую среду описаны в [1].

Между шлаком и ЛЗ существуют большие различия в составе: шлак содержит значительно меньше токсичных веществ, чем ЛЗ. Поэтому проблемы выщелачивания ЗВ, поведение этих ОСТКО при

захоронении, способы обработки для снижения воздействия на окружающую среду, нормативные ограничения необходимо исследовать раздельно.

Настоящая статья представляет собой аналитический обзор зарубежной литературы, посвященной изучению химических свойств и минералогии шлака, процессам выщелачивания тяжелых металлов (ТМ), обработке шлака для уменьшения воздействия на окружающую среду. Кроме того, рассмотрены вопросы использования и захоронения шлака.

СОСТАВ, ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МИНЕРАЛОГИЯ ШЛАКА ОТ СТКО

Современные заводы Европы и США производят около 180–250 кг шлака на 1 т сжигаемых твердых коммунальных отходов (ТКО). Данные для Японии — около 100–150 кг/т — отражают гораздо более низкое содержание инертных веществ в ТКО Японии [28].

Шлак от СТКО весьма неоднороден. Обычно он содержит большое количество стекла, строительных материалов (например, плитки, кирпича), а также мелких фрагментов черных металлов (например, проволока в шинах) [22]. Шлак на 80–85 мас. %

¹ В технологическом процессе сжигания донная зола обычно перемешивается со шлаком — несгоревшим остатком ТКО, и не выделяется в отдельную категорию при классификации твердых остатков МСЗ [3].

состоит из минеральной фракции, металлов (черных 7–10 мас. %, цветных 1–5 мас. %) и незначительной доли другого несгоревшего материала (< 1 мас.%) [3]. Под термином “металл” здесь понимаются куски металла со степенью окисления 0, которые можно отделить от основной массы шлака. Из-за своей экономической ценности металлы извлекаются и впоследствии перерабатываются в металлургической промышленности. Обычно из шлака извлекаются около 85–95 мас. % черных металлов и 40–65 мас. % цветных металлов.

Шлак составляет основную массу ОСТКО и повторно используется во многих странах в качестве строительного материала. Он известен своими физико-химическими характеристиками и метастабильным минералогическим составом

и значительно обогащен токсичными микроэлементами по сравнению с исходным материалом отходов [11].

Шлакоподобный остаток собирается из камеры сгорания. В результате схожих условий эксплуатации шлак, образующийся на разных мусоросжигательных заводах (МСЗ), довольно близок по химическому составу [15]. Для иллюстрации в табл. 1 приведены данные по различным странам о количестве металлов и общего органического углерода (ООУ) в шлаке. В отчете [26] приведены представительные аналитические данные об образцах шлака с трех МСЗ Великобритании и отмечается преобладание Zn, Cu и Pb (ср. с табл. 1). Небольшое количество ЗВ и удовлетворительные механические свойства делают даже необработанный шлак

Таблица 1. Состав шлака от СТКО для разных стран

Компонент	Единица	Дания [15]	Дания [17]	США [17]	Тайвань [17]	Япония [17]	Испания [17]	Различные страны [18]
Al	г/кг	39.1–65.6						21.9–72.8
Ca	- “ -	96.5–108						0.37–123
Cl	- “ -	3.0–9.0						0.8–4.19
Fe	- “ -	79.9–100						4.12–150
K	- “ -	8.8–11.6						0.75–16
Mg	- “ -	10.0–13.1						0.4–26
Na	- “ -	23.2–29.4						2.87–42
S	- “ -	3.5–5.6						1–5
Si	- “ -	198–248						91–308
Ag	мг/кг		4.1–14	2–38	8.5–10.7			0.28–36.9
As	- “ -	25.0–45.2	19–80	1.3–45	209–227	160	13	0.12–189
Ba	- “ -	1360–1750	900–2700	47–2000	1104–1166			400–3000
Cd	- “ -	2.6–3.7	1.4–40	0.3–61	6.8–7.8	110	3	0.3–70.5
Co	- “ -	20.4–26.2	< 10–40	22–706	49.6–53.1			6–350
Cr	- “ -	434–914	230–600	13–1400	323–439	260	900	23–3170
Cu	- “ -	2060–14300	900–4800	80–10700	4139–4474		500	190–8240
Hg	- “ -		< 0.01–3	0.003–2			2.6	0.02–7.75
Mn	- “ -		< 0.7–1.7	50–3100	869–894		280	83–2400
Mo	- “ -	7.62–20.1						2.5–276
Ni	- “ -	242–526	60–190	9–430	216–242		180	7–4280
Pb	- “ -	1080–3530	1300–5400	98–6500	2474–2807		2700	98–13700
Sb	- “ -	51.4–105						
Se	- “ -		0.6–8	0–3.4	230–265	130		0.05–10
Sn	- “ -		< 100–1300			840	960	2–380
Sr	- “ -	311–634	170–350					85–1000
V	- “ -	40.7–59.3	36–90					20–122
Zn	- “ -	2660–4230	1800–6200	200–12400	4261–4535		600	613–7770
ООУ	г/кг	14.0–19.0						

пригодным для использования в качестве дорожно-строительного материала.

Кроме того, выветривание шлака, в основном за счет *карбонизации* (поглощения атмосферного CO_2 и в результате — изменения минералогии с (гидр) оксидов на карбонаты), действует как природный процесс стабилизации для некоторых ТМ, образующих устойчивые карбонатные формы. Поэтому выделение ЗВ из выветрелого шлака обычно не считается серьезной проблемой, и значительная часть образовавшегося шлака используется в качестве строительного материала; например, в Дании это ежегодно составляет более 90% производимого шлака [15].

Необработанный шлак представляет собой минералогически чрезвычайно неоднородный материал, большая часть которого состоит из богатых кальцием минералов и силикатов, иногда обогащенных железом и натрием. Многочисленные исследования привели к выводу, что значительная часть шлаков состоит из продуктов расплава: стекло, минералы группы шпинелей (например, магнетит Fe_3O_4) и группы мелитита (например, геленит $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ и акерманит $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_7$) [15]. Напротив, содержание ЗВ (например, ТМ) довольно низко (см. табл. 1). Поэтому их минеральные фазы сложно идентифицировать экспериментально, они “маскируются” большим количеством макроэлементов. Тем не менее были идентифицированы простые оксиды металлов, например, ZnO . Перечень минералов, обычно обнаруживаемых в шлаке, приведен в [15]: CaSO_4 , $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_7$, CaCO_3 , $\text{Ca}_6\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_3)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_3\text{Cl}_2$, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, SiO_2 , $(\text{Na, Ca})(\text{Fe, Mn})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$, Fe_3O_4 , $\text{Ca}(\text{Mg, Al})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$, Fe_2O_3 , $(\text{K, Ca, Na})(\text{Al, Si})_4\text{O}_8$, FeCO_3 , Al_2O_3 , $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, N_2O , FeCr_2O_4 , CaO , $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, FeO , ZnO , NaCl , CaMoO_4 , NaAsO_2 .

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ИЗ ШЛАКА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Особенности выщелачивания из шлака

Для обеспечения экологически безопасного применения шлака МСЗ необходимо тщательно изучить выщелачивание солей, металлов и металлоидов в предполагаемом сценарии повторного использования [10]. Шлак от СТКО обычно содержит более высокие концентрации опасных веществ (например, металлов и металлоидов) по сравнению с природными материалами, основная проблема его использования в строительстве связана с долгосрочным воздействием на окружающую среду, которое может быть вызвано выделением ЗВ при контакте с водой (т.е. поведением при выщелачивании).

Свойства шлака во многом зависят от состава поступающих отходов и условий эксплуатации МСЗ, например, температуры и технологии сжигания. На поведение шлака при выщелачивании может влиять *валовое содержание компонентов*. Так, присутствие растворенного органического вещества (РОВ), сульфата (SO_4^{2-}) и хлорида (Cl^-) влияет на выщелачивание ТМ. РОВ в шлаке усиливает выщелачивание меди, образуя комплексы $\text{Cu}-\text{РОВ}$. В присутствии ионов SO_4^{2-} происходит связывание большинства ТМ в сульфатных формах. Во время сжигания более высокое содержание Cl^- в ТКО увеличивает летучесть ТМ, что приводит к более низкому содержанию ТМ в шлаке. Это связано с тем, что Cl^- переводит ТМ в подвижное состояние, способствуя их выщелачиванию [19].

Гранулометрический состав шлака также влияет на выщелачивание ЗВ. С одной стороны, некоторые токсичные ЗВ преимущественно сконцентрированы в более мелких частицах. Например, шлак от СТКО с фракцией < 4 мм наиболее загрязнен и содержит токсичные элементы (например, Cu , Cr , Hg и Pb), а также сульфатные и хлоридные соединения ТМ. С другой стороны, более мелкие частицы обладают большей удельной поверхностью, что приводит к большей скорости выщелачивания. Таким образом, мелкие фракции шлака ответственны за повышенное выделение ТМ и нежелательных солей. Отделение мелких фракций путем просеивания и промывания значительно снижает концентрацию ЗВ в фильтрате до уровней ниже допустимых [19].

Что касается *химического состава* шлака, то ТМ из него обычно гораздо труднее выщелачиваются, чем из ЛЗ. Но шлак составляет 85–90% ОСТКО, поэтому общая доля ТМ в шлаке значительна и составляет 61–94% от общего содержания ТМ в ОСТКО, за исключением Cd (табл. 2). При использовании в качестве заполнителя или другого строительного материала шлак будет подвергаться воздействию окружающей среды; поэтому следует учитывать возможность выделение ТМ из шлака [32].

Таблица 2. Доля некоторых ТМ в шлаке с двух заводов в Шанхае (% от общего количества ТМ в ОСТКО) на основе данных мониторинга за год [32]

ТМ	Завод 1	Завод 2
Cd	34.7 ± 12.3	45.4 ± 9.3
Cr	87.0 ± 3.3	93.8 ± 3.0
Cu	83.4 ± 4.2	88.2 ± 10.0
Ni	87.7 ± 5.7	91.4 ± 3.5
Pb	61.2 ± 15.9	65.7 ± 11.8
Zn	78.8 ± 7.6	84.8 ± 6.5

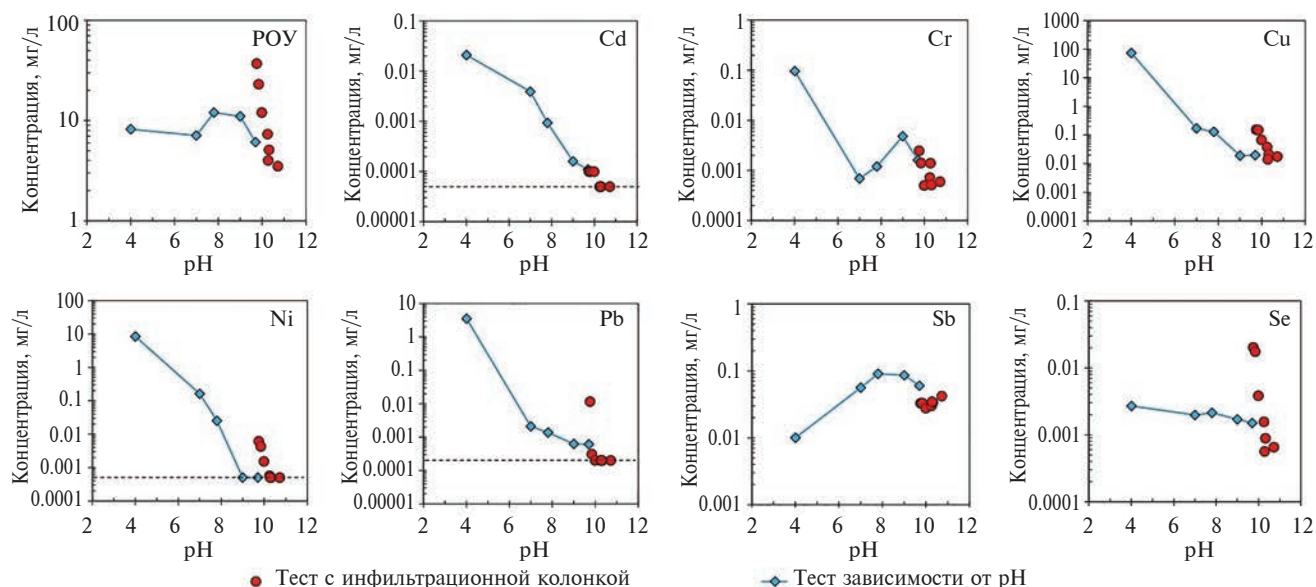


Рис. 1. Концентрации ТМ и РОУ в элюате (мг/л), полученные в тесте с инфильтрационной колонкой и в тесте зависимости выщелачивания от рН. Пунктирные линии — предел обнаружения [10].

Сравнение результатов тестов с натурными данными по выщелачиванию из шлака

Как отмечалось в [1], выщелачиваемость компонентов из отходов, прогнозируемая с помощью лабораторных тестов, может значительно отличаться от их выделения в натуральных условиях. В исследовании [10] сравниваются данные, полученные в ходе продолжающихся полномасштабных натуральных тестов, с экспериментальными результатами, полученными в лаборатории с инфильтрационной колонкой и в тестах выщелачивания в зависимости от рН.

Натурные эксперименты проводились в тестовой секции, оборудованной для изучения использования шлака от СТКО в качестве основания для дорог и на автостоянках, в течение 13 лет. За это время было достигнуто совокупное значение отношения жидкой и твердых фаз (L/S) около 3 л/кг. Состав собранного фильтрата регулярно анализировался. Определялись, в частности, значение рН и концентрации As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Zn, Hg, Se и растворенного органического углерода (РОУ).

При проведении *инфильтрационного теста с колонкой* было собрано семь фракций элюата, соответствующих следующим отношениям L/S: 0–0.1, 0.1–0.2, 0.2–0.5, 0.5–1.0, 1.0–2.0, 2–5 и 5–10 л/кг. Влияние рН на выщелачивание неорганических загрязнителей и РОУ было исследовано с помощью *статического теста выщелачивания зависимости от рН* при L/S ~10 л/кг, рН 4, 7, 8, 9 и естественном рН² [10].

² Естественный рН — исходное значение рН материала без добавления кислоты или основания.

В качестве первой оценки было сделано предположение о возможном выщелачивании компонентов в результате растворимости обычных минералов, в которых они содержатся (см. группа II в [1]).

На рис. 1 на один график нанесены результаты теста с колонкой и результаты, полученные в тесте зависимости выщелачивания от рН. В случае когда значения концентрации компонента в элюате, полученные в тесте с колонкой при каком-либо L/S, подобны результату теста зависимости от рН при соответствующем значении рН элюата (например, различие менее одного порядка), можно считать, что выщелачивание этого компонента в основном определяется растворимостью минералов.

И наоборот, значение концентрации компонента в элюате из тестов с колонкой, слабо коррелирующее с результатами теста в зависимости от рН при аналогичных значениях рН элюата, указывают на то, что выщелачивание компонента определяется другими процессами. Это может быть начальное вымывание с последующим растворением, растворение компонента в минерале, а также процессы сорбции или установление неравновесных условий. Сравнение результатов теста зависимости от рН (проведенного при L/S 10 л/кг) с результатами теста с колонкой (полученными при различных отношениях L/S) позволяет идентифицировать ЗВ, выщелачивание которых определяется только растворимостью минералов (т.е. не зависит от применяемого L/S) [10].

На основе выявленного ключевого механизма, определяющего выщелачивание из шлака конкретного компонента, его потенциальное выделение в натуральных условиях можно оценить по результатам проведенных тестов. Так, для компонентов,

выщелачивание которых в основном зависит от рН при контакте с водой (т.е. происходит растворение), ожидаемые концентрации (мг/л) в природных условиях ($C_{\text{натурн}}$) можно оценить по формуле

$$C_{\text{натурн}} = C_{\text{рН}}(\text{рН}),$$

где $C_{\text{рН}}(\text{рН})$ — это концентрация конкретного компонента при заданном рН, которую можно оценить по результатам *теста рН-зависимости*, принимая в качестве значения рН значение, измеренное в природных тестах с течением времени.

С другой стороны, если не идет процесс растворения, то концентрация компонента $C_{\text{натурн}}$ может быть получена из теста с *инфильтрационной колонкой*

$$C_{\text{натурн}} = C_{\text{кол}}(L/S),$$

где $C_{\text{кол}}(L/S)$ — концентрация при L/S , ожидаемом в природных условиях, которую можно оценить по результатам теста с колонкой при соответствующем значении L/S . Отношения L/S можно рассчитать непосредственно по данным *натурных тестов* путем деления объема собранного фильтрата (м^3) на количество шлака (т сухой массы).

На рис. 1 показаны результаты указанных *лабораторных тестов*, проведенных на образце шлака из тестовой секции, в виде графиков зависимости концентрации ТМ и РОУ в элюате от рН [10]. Для Cd, Cr и Sb концентрации в элюате, полученные в результате теста с колонкой для соответствующих значений рН элюата, при некотором L/S были очень близки к полученным в результате теста зависимости от рН. Т.е. параметром, определявшим выщелачивание вышеупомянутых компонентов, был рН, что указывает на *растворимость минералов* как основной механизм этого процесса.

Напротив, для РОУ и Se тенденции выщелачивания, полученные в результате разных тестов, сильно различались, т.е. основным определяющим параметром было отношение L/S . Это означает, что выщелачивание этих компонентов было в основном обусловлено *доступностью и/или процессом массопереноса*. Для Cu, Ni и Pb концентрации в элюате в двух тестах также различались, т.е. и их выщелачивание не зависело от растворимости минералов. В частности, в тесте с колонкой концентрации в элюате Cu, Ni и Pb при низких отношениях L/S (верхние кружки на рис. 1) были более чем на порядок выше, чем полученные из теста зависимости от рН.

Для компонентов, выщелачивание которых в основном определялось доступностью (например, РОУ и Se), *натурные данные* (не представленные) были близки к результатам теста с колонкой, в частности, при низких отношениях L/S (наиболее важных в процедуре оценки риска).

Для компонентов, выщелачивание которых определялось растворимостью минералов, тест с колонкой имел тенденцию немного завышать концентрации, полученные в природных условиях. Для некоторых компонентов (например, Cd) тенденцию, наблюдавшуюся в природных условиях, более точно описывали результаты тестов зависимости от рН.

Для других компонентов, таких как РОУ, Cr, Cu и Ni, результаты обоих типов лабораторных тестов не соответствовали натурным наблюдениям. В частности, для Cr в природных условиях выделение почти на порядок выше, чем в лабораторных тестах, тогда как для Cu и Ni для теста зависимости от рН, было обнаружено противоположное, особенно при $L/S > 0.5$ л/кг. Снижение выщелачивания Cu и Ni в природных условиях можно предварительно приписать процессам выветривания, в частности карбонизации. Это снижение могло быть также связано с адсорбцией растворимых комплексов меди и никеля с РОУ (фульвокислотами — ФК) на гидроксидах железа и алюминия.

Почти для всех изученных элементов (кроме Cr) отклонения между данными тестов и натурными измерениями находились в пределах одного порядка [10].

Таким образом, прогнозирование выщелачивания ТМ из шлака при его использовании в качестве основания для дорог и на автостоянках, можно выполнить с указанной точностью с помощью лабораторных тестов с инфильтрационной колонкой и тестов выщелачивания в зависимости от рН. Предварительно, на основе результатов этих двух тестов, следует определить для каждого ТМ механизм его выщелачивания, и далее использовать для прогнозного расчета только данные соответствующего теста.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ТМ И ФК ИЗ ШЛАКА

Подход к моделированию

Для исследования механизмов выщелачивания макро- и микроэлементов из шлака в серийном и инфильтрационном режимах было проведено геохимическое моделирование [11]. Примененный прогнозирующий подход к “многоповерхностному” геохимическому моделированию нацелен на согласованность между предполагаемыми процессами, выбранными моделями, входными параметрами и экспериментальными методами их определения, без использования эмпирических данных. Прогнозируется одновременное выщелачивание широкого диапазона макро- и микроэлементов, а также ФК из шлака. Геохимическая часть модели включает растворение/осаждение минералов, а также процессы сорбции на нескольких реактивных

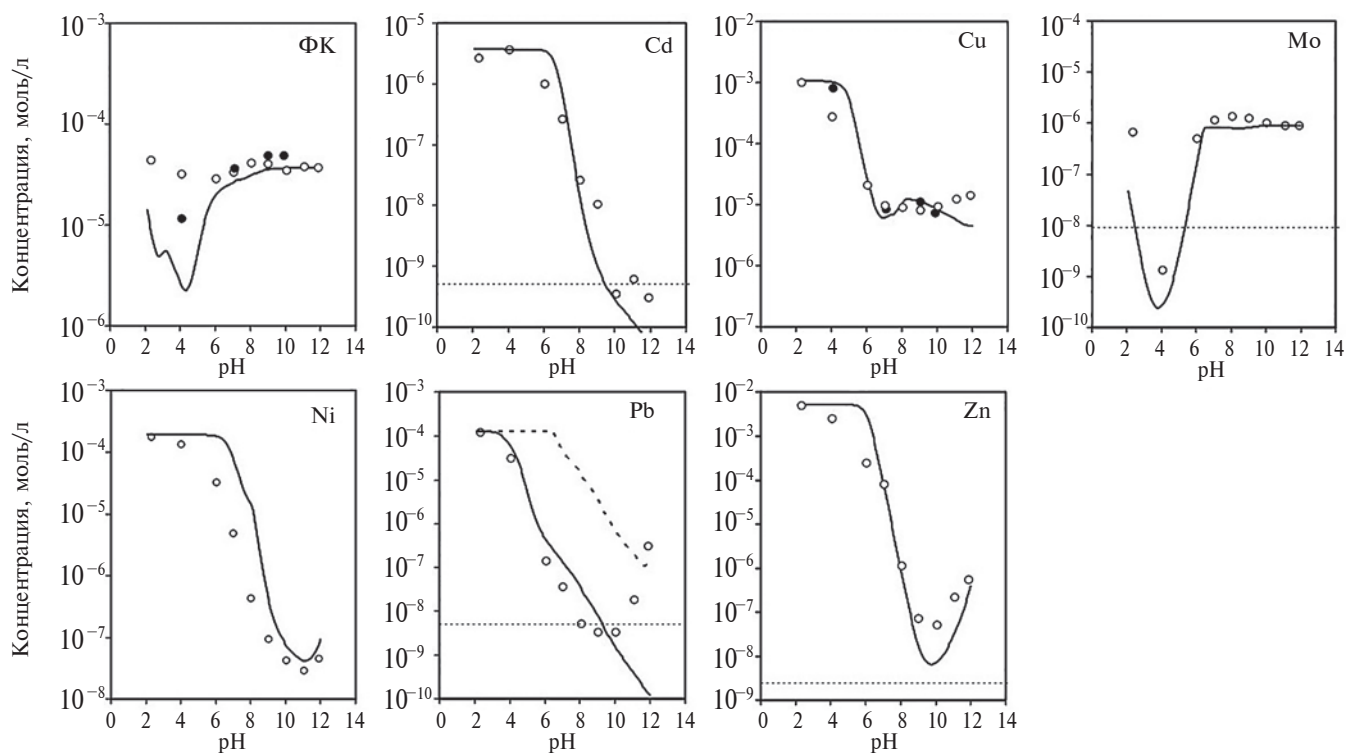


Рис. 2. Концентрации выщелоченных веществ как функции рН, измеренные с помощью статического теста зависимости от рН (белые кружки), и прогнозы модели (линии) для ФК, Cd, Cu, Mo, Ni, Pb и Zn. Черные кружки на диаграммах для ФК и Cu — результаты независимых экспериментов, полученные после более длительного времени уравнивания, составляющего 168 ч. Горизонтальные пунктирные линии — пределы обнаружения. Штриховая линия на диаграмме для Pb — кривая растворимости чистого $Pb(OH)_2(тв.)$ [11].

поверхностях, т.е. поверхностное комплексообразование/осаждение на (гидр)оксидах Fe/Al и комплексообразование ионов с гуминовыми кислотами (ГК) и ФК. Для расчета реактивной миграции геохимическая часть модели была расширена за счет одномерной конвективно/дисперсионной миграции воды в сочетании с массопереносом первого порядка между подвижными и застойными зонами (“двойная пористость”). Для параметризации модели разработан общий перечень входных параметров на основе выборочных химических процессов экстракции (для определения количества и типа реактивных поверхностей) и процессов экстракции с низким рН (для получения оценок количества элементов, доступных для выщелачивания). Выбранные сорбционные модели и наборы параметров применялись без изменений и использовались только опубликованные “общие” термодинамические параметры и параметры связывания, т.е. без подгонки параметров к данным.

Подход к моделированию подтверждается данными, собранными в результате проведения двух стандартизированных тестов выщелачивания, различающихся по концепции и условиям: серийного рН-статического теста [5] и инфильтрационного теста [4]. Собранные данные о рН-зависимом выщелачивании использовались для проверки того,

достаточно ли хорошо описываются моделью геохимические процессы выщелачивания. Данные инфильтрационных тестов с прерываниями потока использовались для оценки достоверности предположения о локальном равновесии и надежности прогнозов модели реактивной миграции.

Прогнозы модели для тестов выщелачивания в зависимости от рН

Измеренные в [11] концентрации и модельные прогнозы ряда важных компонентов (ФК, Cd, Cu, Mo, Ni, Pb и Zn) показаны на графиках относительно рН на рис. 2.

Степень выщелачивания меди из шлака хорошо объясняется поверхностным комплексообразованием с (гидр)оксидами Fe и Al, а также возможностью осаждения $Cu(OH)_2(тв.)$, когда раствор становится перенасыщенным — при рН > 8. При рН > 6 выщелачивание Cu в основном связано с наличием ФК, присутствующих в фильтраатах шлака от СТКО, благодаря формированию растворимых комплексов Cu–ФК. Эти процессы хорошо прогнозируются моделью (см. рис. 2).

Анионная форма молибдена MoO_4^{2-} при высоком рН адекватно прогнозируется (слабым) поверхностным комплексообразованием с Fe- и Al-(гидр)оксидами, а при низком рН (рН ~1) — образованием

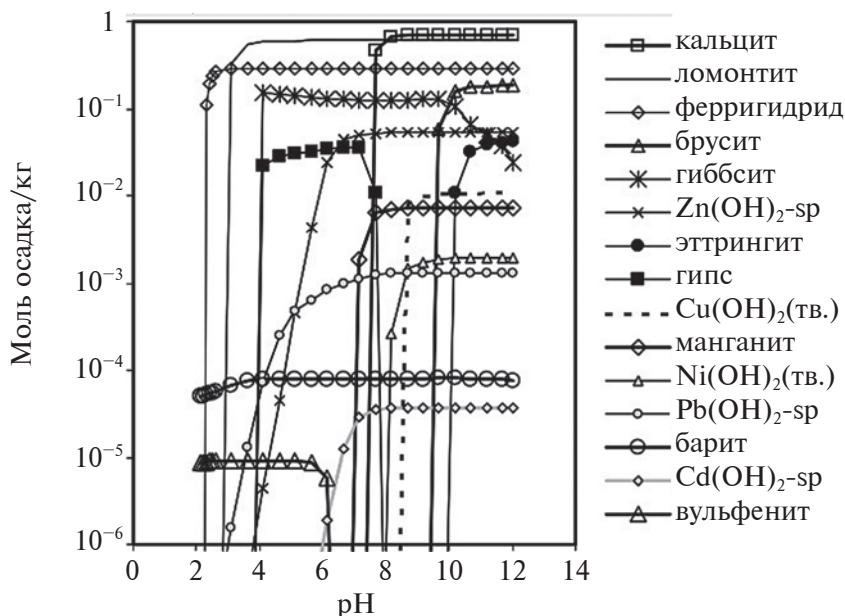


Рис. 3. Минеральные фазы и поверхностные осадки (обозначены -sp), которые могут выпасть в осадок, в зависимости от pH во время прогона модели [11].

вульфенита $PbMoO_4(тв.)$. Выщелачивание *цинка* моделировалось осаждением на поверхности (гидр)оксидов Fe и Al, что привело к адекватным прогнозам модели (см. рис. 2). Концентрации выщелоченного *никеля* моделировались на основе поверхностного комплексобразования с (гидр)оксидами Fe и Al, а также путем осаждения $Ni(OH)_2(тв.)$ по мере его перенасыщения в растворе. Тенденция концентраций выщелоченного Ni хорошо описывается моделью вблизи естественного pH ~ 11.2 (см. рис. 2). Прогнозные концентрации Ni, как правило, выше измеренных. Было также показано, что концентрации Ni при $pH < 10$ продолжали увеличиваться за пределами периода установления равновесия (48 ч), что свидетельствовало о медленных процессах десорбции/растворения.

Предварительные модельные расчеты показали, что полученные низкие концентрации *кадмия* и *свинца* не могут быть объяснены только поверхностным комплексобразованием на (гидр)оксидах Fe и Al. Поэтому в модели для этих ТМ было рассмотрено поверхностное осаждение на (гидр)оксидах Fe и Al, что привело к адекватным описаниям поведения для Cd во всем диапазоне pH и для Pb до pH 10 (см. рис. 2). Концентрации Pb вблизи естественного pH ~ 11.2 лучше соответствуют прогнозируемым по растворимости чистого $Pb(OH)_2(тв.)$, чем по модели поверхностного осаждения (пунктирная кривая на рис. 2). Возможно, происходило образование поверхностных осадков / твердых растворов этих металлов.

Для модели реактивной миграции выбор определяющего процесса растворения/осаждения для металлов Cu, Pb, Ni, Cd и Zn основан на сценарии,

обеспечивающим наиболее близкое соответствие с данными вблизи естественного pH 11.2 (см. рис. 2), ожидаемыми при аналогичных значениях pH фильтрата для инфильтрационных тестов. Поэтому предполагается, что выщелачивание *меди*, *никеля* и *свинца* вблизи естественного значения pH обусловлено растворением их соответствующих (гидр)оксидов, тогда как для *кадмия* и *цинка* определяющим является поверхностное осаждение на Fe- и Al-(гидр)оксидах. Результаты моделирования в основном подтвердили результаты тестов в натуральных условиях.

На рис. 3 представлены минеральные фазы и поверхностные осадки, которые могут формироваться во время прогона модели.

ПРОГНОЗЫ МОДЕЛИ ДЛЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ ТЕСТОВ

Влияние РОУ на выщелачивание ТМ было изучено с помощью моделирования инфильтрационных тестов [11]. В состав выщелоченного РОУ входят ГК, ФК и гидрофильные кислоты. Около 50% выщелоченного РОУ состоит из ФК, процентное содержание которых остается в ходе теста довольно постоянным. Однако их общее содержание уменьшается по мере увеличения отношения L/S. Наблюдения показывают, что практически все ФК вымываются после $L/S = 10$ л/кг, что согласуется с наблюдаемым слабым взаимодействием ФК с реактивными поверхностями, присутствующими в матрице шлака при высоких значениях pH. ГК были определены только в первых фракциях теста с очень низкой концентрацией. Это можно

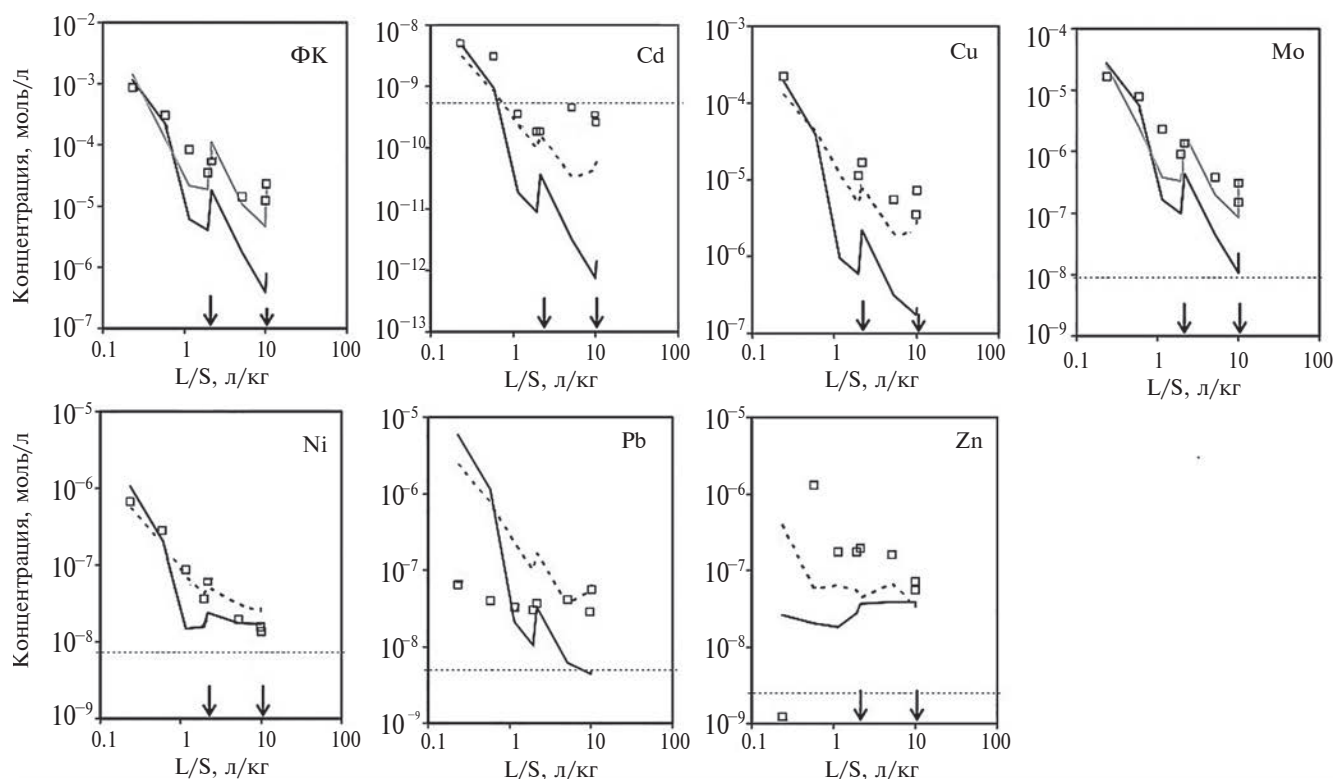


Рис. 4. Результаты инфильтрационных тестов и прогнозы модели для ФК, Cd, Cu, Mo, Ni, Pb и Zn, выраженные как функция совокупного отношения L/S (л/кг). Стрелки у оси абсцисс — фракции, собранные сразу после прерывания потока (при L/S ~2.2 и 10 л/кг, соответственно). Сплошные линии — прогнозы модели реактивной миграции. Штриховые линии на диаграммах для Cu, Ni, Cd, Pb и Zn — прогнозы модели, рассчитанные для каждой точки данных отдельно. Сплошные серые линии на диаграммах для ФК и Mo — альтернативный сценарий модели с другим набором кинетических параметров. Горизонтальные пунктирные линии — пределы обнаружения [11].

объяснить присутствием значительных количеств двух- и трехвалентных ионов металлов (например, Ca, Al и Fe), снижающих растворимость ГК за счет комплексообразования с последующей коагуляцией.

Результаты инфильтрационных тестов для ТМ и кривые, полученные с помощью модели реактивной миграции [11], представлены на рис. 4.

Модель прогнозирует практически полное вымывание ФК из колонки, что следует из прогнозной полной десорбции при значениях pH, близких к естественному pH образца (pH ~11.2; см. рис. 2). Тем не менее концентрации ФК все больше недооцениваются моделью в сторону более высоких отношений L/S. Уточненная модель (серая линия на рис. 4) использует в качестве входных данных совокупное выщелоченное количество ФК вместо расчетной доступности в сочетании с модифицированными параметрами двойной пористости.

Серая линия для Mo на рис. 4 показывает, что миграция этого компонента адекватно описывается с использованием тех же кинетических параметров, что и для ФК. Это сходство позволяет предположить аналогичный процесс выщелачивания для ФК и Mo.

Прогноз модели реактивной миграции для Ni (см. рис. 4) дал адекватные результаты во всем диапазоне L/S. Прогнозы модели для миграции Cd и Cu показывают, что начальные концентрации выщелачивания моделируются адекватно, но при увеличении отношения L/S концентрации становятся все более недооцененными. Прогнозы модели для Pb намного выше измеренных значений при низких L/S и немного лучше при более высоких L/S, где отклонение составляет примерно один порядок. Исключительное поведение наблюдается для Zn, концентрация которого в первой фракции элюата оказалась ниже предела обнаружения.

Дополнительные модельные расчеты показали, что при отношении L/S до 10 л/кг в колонке не происходит значительного удаления “доступной” концентрации металла. Эти расчеты (штриховые линии на рис. 4) дают особое представление о том, в какой степени прогнозные концентрации металлов могут быть улучшены, когда ключевые параметры pH, ФК и ГК прогнозируются в ходе миграции. Использованный модельный сценарий показал лучшее описание процесса выщелачивания для Cu, Ni, Cd, Pb и Zn, но при этом модель реактивной миграции требует уточнения в отношении прогнозирования pH, ФК и ГК.

Наблюдаемое и прогнозное поведение различных металлов авторы исследования [11] объяснили способностью металлов к комплексообразованию. Состав раствора авторы подразделяли на “комплексы с ФК”, “комплексы с ГК”, “неорганические комплексы” и “свободные ионы” (Me^{2+}). Металлы Cu, Cd и Pb, по прогнозам, фактически на 100% образуют комплексы с выщелоченными гумусовыми веществами (ФК и ГК) во всем диапазоне L/S. Роль такого комплексообразования металлов особенно заметна при низких отношениях L/S, когда концентрации ФК и ГК наиболее высоки. Оценка Pb, особенно при низких L/S, сильно завышена (см. также рис. 2). Ni первоначально присутствует в основном в виде комплексов ФК–Ni, но при более высоких отношениях L/S доминирующие виды Ni — это неорганические комплексы. Это объясняет довольно стабильные прогнозные концентрации Ni при увеличении L/S, тогда как концентрации Cd, Cu и Pb точно следуют за непрерывно снижающимися концентрациями ФК. Выщелоченный Zn не обнаруживает значительного взаимодействия с ФК, но в первых нескольких фракциях он, возможно, образует прочные комплексы с низкими концентрациями ГК и, подобно Ni, преимущественно неорганические комплексы при более высоких значениях L/S. Предполагается, что, Cd и Cu также будут проявлять значимое взаимодействие с низкими концентрациями ГК, определенными в фильтратах [11]. Можно сделать вывод, что различия в прогнозном составе между металлами являются результатом их различного сродства к гумусовым веществам и разной способности образовывать гидроксокомплексы, особенно при высоких значениях pH. Для каждого металла в отдельности на видовой состав также влияет относительное различие в сродстве связывания для ГК и ФК.

ОБРАБОТКА ШЛАКА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Рассмотрим применение для шлака наиболее распространенных методов обработки ОСТКО [1]. Простейшая обработка *выдерживанием и выветриванием* может значительно изменить химические и минералогические характеристики ОСТКО. Шлак часто захоранивается вместе с отходами в виде покрытия полигонов или на смешанных полигонах, при этом *ускоренное выветривание* обеспечивает эффективную предварительную обработку для уменьшения его выщелачивания. Кроме того, *ускоренная карбонизация* также эффективна для вымывания ионов Cl^- и, таким образом, может позволить использовать очищенный шлак в строительстве, где требуется низкое содержание хлоридов. Однако исследования [19] показали, что содержание органических загрязнителей (например, ПАУ) в выветрелом шлаке от СТКО превышало местные общие

нормативы для чувствительного землепользования. Канцерогенные ПАУ были прочно связаны со шлаком и не поступали в окружающую среду во время размещения на полигоне в небольших объемах на открытом воздухе. Другие исследования показали, что после природного выветривания содержание ООУ в шлаке и фильтрате снизилось до 70% и 40%, соответственно, а затем после ускоренной карбонизации до 55% и 25%, соответственно [19].

В отчете [26] для образцов шлака с трех МСЗ Великобритании представлены результаты тестов выщелачивания при отношении L/S 10 л/кг необработанного, карбонизированного шлака, а также обработанного шлака со смесью деионизированной воды и азотной кислоты (табл. 3).

Обработки сильно повлияли на содержание металлов в элюате. Выщелачивание некоторых металлов уменьшилось за счет обеих обработок (например, Pb). Карбонизация снизила выщелачивание Cu и Zn и резко увеличила выщелачивание Sb. Обработка кислотой значительно увеличила выщелачивание Zn, Cu, Cd, Sb, V, As, Mo. Выщелачивание Cu немного уменьшилось при карбонизации, но увеличилось при кислотной обработке. Обе обработки практически не повлияли на выщелачивание Cr. Обработки понизили значение pH фильтрата (примерно с 12 до 9–11 и 7–10 для карбонизации и кислотной обработки, соответственно). Одно из значительных преимуществ карбонизации перед нейтрализацией кислотой — снижение pH без потери буферизирующей способности из-за осаждения кальцита [26].

Таблица 3. Влияние карбонизации и кислотной обработки шлака от СТКО на выщелачивание ТМ (мкг/л) [26]

Металл	Концентрация металлов в элюате при L/S 10 л/кг		
	необработанный	карбонизированный	обработанный кислотой
As	< 1	< 1	< 1–4
Cd	< 1	< 1	< 1–35
Cr	6–20	12–30	10–35
Cu	500–1300	200–600	700–2200
Mo	50–70	70–90	100–110
Pb	1000–4000	< 1–6	2–20
Sb	< 10–15	20–100	100–200
Se	< 1	< 1	1–3
V	< 10	< 5–18	10–45
Zn	200–1000	~10	10–11000

Возможным решением для минимизации выщелачивания является *введение химических реагентов в цементный раствор*, смешанный со шлаком [19].

При *биовыщелачивании* [1] органические вещества (ОВ) в шлаке могут окисляться микроорганизмами в процессе дыхания. Это обеспечивает энергию для роста микроорганизмов и высвобождает углекислый газ, который затем вступает в реакцию со шлаком, дополняя обработку карбонизацией и влияя на выщелачивание металлов. Остаточные ОВ в шлаке способствуют развитию биопленок, которые могут улавливать и связывать токсичные металлы. По сути, микробное дыхание играет решающую роль в стабилизации ОВ. Без него может происходить выщелачивание РОВ и, следовательно, выщелачивание металлов усилится за счет комплексообразования с РОВ [19].

Была изучена *электрокинетическая обработка* шлака от СТКО [27]. Представлены результаты четырех экспериментов по ремедиации для удаления Pb, Cu, Zn, Cd и хлоридов. После обработки концентрации ЗВ в фильтрате снизились на 31–83%.

Гидротермическая обработка способна отверждать шлак при относительно низкой температуре (150–200°C), причем в больших масштабах [19]. Обработка обеспечивает адсорбцию или удерживание ТМ в алюмосиликатных минералах [29]. Тесты выщелачивания показали, что после такой обработки концентрации растворенных ТМ резко уменьшились и стали ниже нормативных уровней [19].

Методы *высокотемпературной обработки* шлака могут быть использованы для получения экологически устойчивого материала. Такие методы предназначены для уменьшения выщелачивания опасных компонентов, удаления токсичных соединений, уменьшения объема и получения материала, подходящего для использования [18]. Эти методы энергозатратны и более актуальны для ЛЗ; часто термическая обработка применяется к смеси шлака и ЛЗ.

Проводились исследования *спекания* для шлака от СТКО [6]. *Остекловывание* шлака с голландского МСЗ изучалось в [30]. Гомогенный стекловидный продукт образовывался при температурах от 1360 до 1500°C. В собранном шлаке также присутствовала металлическая фаза. Она состояла в основном из Fe (82 мас. %) и Cu (12 мас. %). Показатели выщелачивания остеклованного продукта были значительно ниже, чем у исходного шлака. Японские исследователи [25] рассмотрели различные технологии *плавления* для образования стабильного и нетоксичного продукта из шлака и ЛЗ МСЗ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ЗАХОРОНЕНИЕ ШЛАКА ОТ СТКО

Возможности использования шлака

В Европейском Союзе (ЕС) шлак либо захоронивается на полигонах (включая их обустройство), либо используется в секторе гражданского строительства в качестве вторичного сырья. Некоторые страны используют до 100 мас. % минеральной фракции шлака в строительстве, другие страны захоронивают до 100 мас. % этого остатка на полигонах. Такие разные уровни использования могут быть следствием различных барьеров и/или причин, которые могут иметь технический, экологический, экономический или законодательный характер [3].

В ЕС, Норвегии и Швейцарии действуют 463 завода СТКО. Они могут сжигать около 90 млн т/год ТКО и промышленных отходов аналогичного состава. Из этих отходов 17.6 млн т/год переходят в шлаки, что соответствует примерно 20 мас. % годовой мощности сжигания в этих странах. Большинство европейских стран (16 из 22) разрешают использование шлаков за пределами полигонов. Но только 11 пользуются этим разрешением и применяют шлаки на практике. В тех странах, где это практикуется, коэффициент использования шлаков колеблется от 20 до 100 мас. %. С 2015 по 2019 г. в ЕС, Норвегии и Швейцарии примерно 54 мас. % всего произведенного шлака было использовано за пределами полигонов [3].

Шлак от СТКО обычно не относят к опасным отходам, и в многочисленных исследованиях изучалось повторное использование шлака в строительных материалах с позиций экономики замкнутого цикла [22]. Но некоторые исследователи сообщили о высоких уровнях выщелачивания хлоридов и ТМ [23], что может быть препятствием для повторного использования шлака без предварительной обработки [22]. По данным [28], относительно содержания диоксинов шлак современных МСЗ не представляет опасности для окружающей среды и во многих случаях соответствует национальным стандартам качества, что позволяет использовать его в качестве вторичного материала в строительном секторе.

Шлак от СТКО используется в качестве *заполнителя в портландцементе*. Однако, несмотря на быстрый прогресс в исследованиях ОСТКО, различные эксперты, правительства и общественность по-прежнему придерживаются неоднозначных взглядов на применение таких материалов в строительстве, особенно с учетом экологической устойчивости [29]. Так, при включении шлака в производство портландского клинкера было получено значительное увеличение содержания ТМ в цементе (Cd 310%, Pb 170%, Hg 90%, Zn 70%, Cu 20%) [14]. Содержание As и Cd в полученном

бетоне лишь немного ниже предельных значений, установленных законом о рециклинге строительных материалов в Австрии.

Шлак от СТКО также подходит для использования в качестве нежестких, гидравлически связанных или связанных битумом материалов в *дорожных покрытиях*. Такие приложения получили широкое распространение в Дании, Нидерландах и Бельгии, где отвод ОСТКО с полигонов отходов имеет весьма существенное значение в соответствии с концепцией экономики замкнутого цикла. В [31] показано, что шлак от СТКО в Китае может использоваться в качестве хорошо отсортированного гравия или песка в дорожном строительстве при условии надлежащего решения проблемы выщелачивания ТМ.

Шлак от СТКО в качестве исходного материала для гидротермической обработки при соответствующем соотношении Ca/Al/Si формирует новые минеральные фазы, такие как катоит $[\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}]$, цеолит $[\text{Me}_{2/n}\text{OAl}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}]$ и тоберморит $[\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$. Эти продукты могут далее использоваться в качестве *сорбирующих материалов* для удаления органических ЗВ и ионов металлов из воды без значительного риска токсичности [19].

Спекание шлака можно использовать для производства различных видов продукции, например *заполнителей бетона или монолитной керамики* [6], которая может применяться в качестве промышленной плитки для полов, стен и крыш, облицовки труб и каналов. Авторы [13] показали, что продукт остекловывания шлака итальянского МСЗ можно использовать в качестве заполнителей при производстве *строительного раствора и бетона*. В [21] изучено остекловывание шлака с двух португальских МСЗ и показано, что полученные стекла могут быть в дальнейшем переработаны в *стеклокерамику* для использования в строительстве. Отметим, что плавление ОСТКО обычно требует меньше энергии, чем производство силикатного стекла из обычного сырья [2].

Еще одно возможное применение шлака от СТКО: преобразование в *пористые адсорбенты*. Сообщалось об удовлетворительных характеристиках адсорбции гидротермически обработанным шлаком 3-хлоранилина и триклозана (используются в пестицидах, фармацевтических препаратах и товарах личной гигиены) с максимальной адсорбционной способностью 62.43 мг/г и 42.37 мг/г, соответственно. Также наблюдалась эффективная работа адсорбента, полученного при гидротермической обработке шлака, по отношению к ионам Cu(II) с максимальной адсорбционной емкостью 270.27 мг/г [20]. Такой адсорбент является перспективным для удаления Cu из сточных вод.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХОРОНЕНИЯ ШЛАКА НА МОДЕЛЬНЫХ ПОЛИГОНАХ

В Китае шлак от СТКО часто используется на полигонах отходов вместо природных минералов в качестве защитного слоя для сохранения геомембраны от повреждений, промежуточного слоя и дренажного слоя для фильтрата [16]. Однако шлак содержит высокие уровни ТМ. Слой шлака повышает содержание ТМ на полигоне, что может увеличить потенциальную угрозу, если произойдет внезапное выделение, например, Cu и Zn. Тем не менее совместное захоронение шлака с ТКО может и не приводить к увеличению выщелачивания металлов из-за высокой кислотонейтрализующей способности шлака, которая может повысить pH, способствуя удерживанию ТМ.

В исследовании [16] были оборудованы три модельных полигона: традиционный полигон ТКО (R1); полигон с массовым отношением слоя шлака, размещенного в середине тела отходов, к слоям ТКО 1:9 (R2); полигон с массовой долей шлака 2:8 (R3). Отношение 2:8 было выбрано как близкое к практическому соотношению шлака и ТКО в провинции Чжэцзян (Китай). Среди ТМ Cu и Zn вызывают особую озабоченность, поскольку их содержание в шлаке и ТКО относительно высоко. Обсуждалось влияние слоя шлака на разгрузку Cu и Zn и на их содержание в захороненных ТКО. Результат исследования может служить научным ориентиром для контроля загрязнения ТМ, когда шлак используется в качестве защитного слоя, промежуточного слоя или дренажного слоя на полигоне.

Было отмечено высокое значение pH (11.17) в слое шлака, что могло быть связано с высоким содержанием щелочных гидроксидов и минералов Ca, Al, Fe и K, таких как CaCO_3 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Содержание Cu и Zn в шлаке составляло 314.6 и 1922.0 мг/кг, соответственно; для сравнения в Швейцарии 4000 и 3500 мг/кг, в Японии 2818 и 4229 мг/кг, соответственно. При использовании в качестве покрытия слой шлака значительно увеличивал содержание Cu и Zn в телах полигонов R2 и R3.

Концентрации меди в фильтратах R1, R2 и R3 в течение первых 150 сут снижались. Начальная концентрация Cu в фильтрате была относительно высока — около 3.1 мг/л. Считается, что в начале эксперимента большая часть нестабильной меди в шлаке и ТКО склонна вымываться. В конце исследования (230 сут) концентрация Cu вновь немного повысилась, примерно на 0.7 мг/л. Это может быть результатом разложения ТКО с выщелачиванием части Cu, связанной с ОВ. Концентрация Cu в фильтрате превышала Стандарт разгрузки сточных вод Китая (≤ 0.5 мг/л) до 59-х суток и после 144 суток. Примерно одинаковое поведение Cu для трех полигонов, видимо, связано с высоким уровнем содержания в ТКО органических лигандов. Фракционирование Cu в фильтратах показывает,

что почти вся Cu присутствует в виде твердых частиц и коллоидного вещества (> 0.45 мкм) и нелabileго комплекса. Это означает, что большая часть меди в фильтрате связана с ОВ. Общая разгрузка Cu из R1, R2 и R3 примерно одинакова и показывает, что слой шлака не может влиять на разгрузку меди с полигона [16].

Содержание меди в слое ТКО трех модельных полигонов в течение периода исследования быстро снижалось и затем медленно повышалось. Среднее содержание Cu в этом слое соответствовало порядку $R3 > R2 > R1$ — в соответствии с массовыми долями шлака. Таким образом, шлак от СТКО может увеличивать содержание Cu в слое ТКО под ним. Фактически, содержание Cu в ТКО полигона R1 уже превышало Стандарт для почв Китая (≤ 50 мг/кг) [16].

Концентрация цинка в фильтрах снижалась в течение первых 144 суток, далее до 200-х суток повышалась, затем вновь наблюдалась тенденция к снижению. Результаты исследования показали, что разгрузка Zn с полигона зависит от массовой доли шлака. Когда она недостаточно высока для нейтрализации кислых условий, разгрузка Zn будет заметно увеличиваться. Напротив, когда массовая доля шлака достаточно высока для нейтрализации кислых условий, разгрузка Zn может уменьшиться. В течение периода исследования концентрация Zn в трех фильтрах превышала Стандарт разгрузки сточных вод Китая (≤ 1.0 мг/л). Слой шлака с массовой долей 10% еще больше увеличивал экологическую опасность от Zn в фильтрате [16].

Среднее содержание цинка в слое ТКО под шлаком после 77-х суток соответствовало последовательности $R3 > R2 > R1$.

Таким образом, слой шлака от СТКО может увеличить содержание Cu и Zn в расположенном под ним слое отходов в теле полигона. Это может означать, что ТКО обладают высокой адсорбционной способностью по отношению к ТМ, включая Cu и Zn . На адсорбцию сильно влияет рН. Низкий рН может уменьшить связывание металлов с ТКО. Поэтому слой шлака может увеличить потенциальную угрозу от полигона. После кислотного дождя ТМ в ТКО могут выщелачиваться.

Разгрузка Zn с полигона зависит от массовой доли шлака. Когда она составляет по отношению к ТКО 1:9, что недостаточно для нейтрализации кислых условий, разгрузка Zn увеличивается. Но выделение Zn можно уменьшить, если массовая доля слоя шлака относительно ТКО составит 2:8, что позволит нейтрализовать кислые условия. В отличие от Zn , разгрузка Cu мало зависит от слоя шлака из-за высокого сродства Cu к органическим лигандам. Содержание ОВ достаточно велико на всех трех модельных полигонах, что привело к сходному поведению Cu при выщелачивании. Со временем медь и цинк выщелачиваются из слоя шлака и затем удерживаются ТКО, находящимися

под шлаком. В результате их содержание в этой части полигона увеличивается. Следовательно, слой шлака от СТКО может повысить потенциальную угрозу полигона для окружающей среды [16].

НОРМАТИВНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЛИ ЗАХОРОНЕНИИ ШЛАКА

В ЕС приняты правила, составляющие правовую основу для операций по обращению с отходами. Эти правила на уровне ЕС служат ориентиром для минимизации воздействия на окружающую среду и здоровье человека в результате деятельности по обращению с отходами. Хотя указанные правила должны применяться всеми членами союза, государства могут принимать собственные индивидуальные законодательства в этих рамках. В некоторых странах действуют руководящие принципы, другие приняли законодательные акты (постановления, указы, приказы и т.д.), а в Португалии власти решают индивидуально в каждом конкретном случае [3].

Директива 2010/75/EU о промышленных эмиссиях [12] юридически обязательна для всех стран-членов ЕС. Ее минимальными требованиями являются, например, рабочие условия, обеспечивающие надлежащую конверсию отходов; так что образующийся шлак либо имеет общее содержание органического углерода ниже 3 мас. %, либо потеря при прокаливании составляет менее 5 мас. %. Кроме того, директива требует, чтобы оператор МСЗ сводил к минимуму количество и опасность ОСТКО и, при необходимости, перерабатывал их на месте или за его пределами. Предварительно должны быть оценены химические и физические свойства и потенциал загрязнения, включая определение общей растворимой фракции и растворимой фракции ТМ. Помимо этих минимальных требований, в данном документе не определены более подробные параметры.

Остатки от сжигания отходов сами считаются отходами и, следовательно, подпадают под действие *Решения Комиссии ЕС 2014/955/EU* [7]. В этом решении устанавливается так называемый Список отходов (LoW), который определяет типы отходов и классифицирует их как опасные или неопасные. Относительно шлака от СТКО основное значение имеют три позиции в LoW: 19 01 02 — черные металлы, удаленные из шлака, 19 01 11 — донная зола и шлак, содержащие опасные вещества, и 19 01 12 — донная зола и шлак, кроме указанных в 19 01 11. Следовательно, шлак должен быть проверен, обладает ли он каким-либо из 15 опасных свойств, указанных в *Регламенте Комиссии ЕС № 1357/2014* [8], и должно быть оценено, присутствуют или превышают ли стойкие органические загрязнители уровни, указанные в *Регламенте ЕС № 850/2004* [24].

Однако для использования шлака в качестве вторичного сырья в строительном секторе не существует согласованного метода тестирования и соответствующих предельных значений на уровне ЕС; в результате разные государства разработали собственные правила. Поскольку напрямую сравнивать предельные значения выщелачивания непрактично из-за различных методов тестирования, необходимо было найти общую базу. Такой общей базой являются требования ЕС к выщелачиванию материалов на полигонах инертных отходов — табл. 4. Хотя эти типы полигонов: а) не предназначены для захоронения остатков сжигания, и б) критерии для захораниваемых материалов полностью основаны на сценарии, отличном от использования материала в сооружениях, это все же приемлемый выбор.

Соответствие предельным значениям для полигонов инертных отходов может быть определено с помощью *серийного теста* при отношении L/S, равном 2 или 10 л/кг, и *инфильтрационного теста* при L/S = 0.1 л/кг [9]. Поэтому для полигонов инертных отходов были установлены конкретные предельные значения для этих трех тестов. Предполагалось, что эти предельные значения приведут к равным уровням защиты для почвы и грунтовых вод [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сжигании твердых коммунальных отходов (СТКО) образуются так называемые твердые остатки (ОСТКО), которые необходимо обрабатывать дополнительно. Производятся два основных типа ОСТКО: шлак и летучая зола. Шлак содержит

значительно меньше токсичных веществ, чем ЛЗ. Поэтому проблемы выщелачивания загрязнителей, способы обработки для снижения воздействия на окружающую среду, поведение при захоронении, нормативные ограничения для шлака необходимо исследовать отдельно от ЛЗ.

Шлак от СТКО повторно используется во многих странах в производстве строительных материалов. Он обладает сложными физико-химическими характеристиками и метастабильным минералогическим составом, значительно обогащен потенциально токсичными микроэлементами (например, ТМ), по сравнению с исходным материалом отходов. При использовании в качестве заполнителя или другого строительного материала шлак будет часто подвергаться воздействию окружающей среды; поэтому следует проявлять осторожность с потенциалом высвобождения ТМ из шлака. Могут иметь место повышенные концентрации некоторых ТМ в фильтрате. Значения pH обычно высоки (pH 8.5–11.5). Карбонизация (взаимодействие с углекислым газом) действует как природный процесс стабилизации для многих ТМ. Поэтому выделение ТМ из выветрелого шлака обычно не считается серьезной проблемой.

Для снижения выщелачивания загрязняющих веществ при захоронении или использовании шлака исследуются и применяются различные методы обработки: выдерживание и выветривание, ускоренная карбонизация, обработка кислотой, введение химических реагентов, биовыщелачивание, электрокинетическая, гидротермическая или высокотемпературная обработка (спекание, остекловывание, плавление).

При изучении поведения шлака при захоронении на полигонах ТКО был сделан вывод, что слой

Таблица 4. Предельные значения содержания ТМ для приема на полигоны для инертных отходов в ЕС [9]

Тест выщелачивания:	Серийные тесты (высвобождение на единицу веса отходов)		Инфильтрационный тест (концентрация в фильтрате)
	L/S, л/кг:	2	
Единица измерения:	мг/кг сух. вес	мг/кг сух. вес	мг/л
As	0.1	0.5	0.06
Ba	7	20	4
Cd	0.03	0.04	0.02
Cr (общий)	0.2	0.5	0.1
Cu	0.9	2	0.6
Hg	0.003	0.01	0.002
Mo	0.3	0.5	0.2
Ni	0.2	0.4	0.12
Pb	0.2	0.5	0.15
Sb	0.02	0.06	0.1
Se	0.06	0.1	0.04
Zn	2	4	1.2

шлака от СТКО может повысить потенциальную угрозу полигона для окружающей среды. Результат исследования может служить научным ориентиром для контроля загрязнения ТМ, когда шлак используется в качестве защитного слоя, промежуточного слоя или дренажного слоя фильтрата на полигоне.

Европейский Союз (ЕС) принял правила, составляющие правовую основу для операций по обращению с отходами. Директива 2010/75/EU о промышленных эмиссиях требует сводить к минимуму количество и опасность остатков СТКО и, при необходимости, перерабатывать их. Перед переработкой должны быть оценены химические и физические свойства и потенциал загрязнения, включая определение общей растворимой фракции и растворимой фракции ТМ. В качестве предельных значений для безопасности шлака от СТКО приняты требования ЕС к выщелачиванию материалов на полигонах инертных отходов.

Для обеспечения экологически безопасного использования шлака от СТКО необходимо тщательно изучить высвобождение солей, металлов и металлоидов в предполагаемом сценарии повторного использования.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Юганова Т. И. Остатки от сжигания твердых коммунальных отходов: состав, выщелачивание загрязнителей подземных вод, обработка для уменьшения воздействия на окружающую среду // Геоэкология. 2023. № 5. С. 65–78 (Yuganova T. I., Putilina V. S. [Residues from municipal solid waste incineration: composition, groundwater pollutant leaching, and treatment to reduce environmental impact]. *Geoekologiya*, 2023, no. 5, pp. 65–78.).
2. Bingham, P.A., Hand, R. J. Vitrification of toxic wastes: a brief review. *Advances in Applied Ceramics*, 2006, vol. 105, no. 1, pp. 21–31.
3. Blasenbauer, D., Huber, F., Lederer, J., et al. Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe. *Waste Management*, 2020, vol. 102, pp. 868–883.
4. CEN/TS14405:2004. Characterization of Waste — Leaching Behaviour Tests — Up-Flow Percolation Test (Under Specified Conditions) / European Committee for Standardization (CEN), 2017, 6 pp.
URL: https://infostore.saiglobal.com/pre-view/258632207872.pdf?sku=880328_SAIG_NSAI_NSAI_2091468 (date of access: 02/05/2023).
5. CEN/TS14997:2006. Characterization of waste — Leaching behaviour tests — Influence of pH on leaching with continuous pH-control, 2015.
URL: [https://www.evs.ee/en/cen-ts-14997-2006_\(date_of_access:02/05/2023\)](https://www.evs.ee/en/cen-ts-14997-2006_(date_of_access:02/05/2023)).
6. Cheeseman, C.R., Monteiro, da Rocha S., Sollars, C., et al. Ceramic processing of incinerator bottom ash. *Waste Management*, 2003, vol. 23, no. 10, pp. 907–916.
7. Commission Decision of 18 December 2014 amending Decision 2000/ 532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council (Text with EEA relevance). (2014/ 955/EU). *Official Journal of the European Communities*, 30.12.2014, L 370, pp. 44–86.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014D0955> (date of access: 2/05/2023).
8. Commission Regulation (EU) No 1357/2014 of 18 December 2014 replacing Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Communities*, 19.12.2014, L 365, pp. 89–96.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R1357> (date of access: 02/05/2023).
9. Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC. European Council (2003/33/EC). *Official Journal of the European Communities*. 16.1.2003, L 11, pp. 29–49.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003D0033> (date of access: 02/05/2023).
10. Di Gianfilippo, M., Hyks, J., Verginelli, I., Costa, G., et al. Leaching behaviour of incineration bottom ash in a reuse scenario: 12 years-field data vs. lab test results. *Waste Management*, 2018, vol. 73, pp. 367–380.
11. Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C., van der Sloot, H.A., Comans, R.N. A consistent geochemical modelling approach for the leaching and reactive transport of major and trace elements in MSWI bottom ash. *Applied Geochemistry*, 2008, vol. 23, no. 6, pp. 1544–1562.
12. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast) (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Communities*, 17.12.2010, L 334, pp. 17–119.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075> (date of access: 02/05/2023).
13. Ferraris, M., Salvo, M., Ventrella, A., Buzzi, L., Veglia, M. Use of vitrified MSWI bottom ashes for concrete production. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 3, pp. 1041–1047.
14. Holm, O., Simon, F. G. Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. *Waste Management*, 2017, vol. 59, pp. 229–236.
15. Hykš, J. Leaching from Municipal Solid Waste Incineration Residues. Ph.D. thesis / Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering, 2008, 64 pp.
URL: <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/961973> (date of access: 02/05/2023).
16. Kong, Q., Yao, J., Qiu, Z., Shen, D. Effect of mass proportion of municipal solid waste incinerator bottom ash layer to municipal solid waste layer on the Cu and Zn discharge from landfill. *BioMed Research International*, 2016, vol. 2016, Iss. 9687879.
17. Lam, C.H.K., Ip A. W.M., Barford J. P., McKay G. Use of incineration MSW ash: A review. *Sustainability*, 2010, vol. 2, no. 7, pp. 1943–1968.
18. Lindberg D., Molin, C., Hupa, M. Thermal treatment of solid residues from WtE units: a review. *Waste Management*, 2015, vol. 37, pp. 82–94.
19. Luo, H., Cheng, Y., He, D., Yang, E.-H. Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 668, pp. 90–103.

20. Luo, H., He, D., Zhu, W., Wu, Y., Chen, Z., Yang, E.-H. Humic acid-induced formation of tobermorite upon hydrothermal treatment with municipal solid waste incineration bottom ash and its application for efficient removal of Cu(II) ions. *Waste Management*, 2019, vol. 84, pp. 83–90.
21. Monteiro, R.C.C., Figueiredo, C.F., Alendouro, M.S., et al. Characterization of MSWI bottom ashes towards utilization as glass raw material. *Waste Management*, 2008, vol. 28, no. 7, pp. 1119–1125.
22. Nikravan, M., Ramezani-pour, A.A., Maknoon, R. Study on physiochemical properties and leaching behavior of residual ash fractions from a municipal solid waste incinerator (MSWI) plant. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 260, Iss. 110042.
23. Quina, M.J., Bordado, J.C., Quinta-Ferreira, R.M. Treatment and use of air pollution control residues from MSW incineration: An overview. *Waste Management*, 2008, vol. 28, no. 11, pp. 2097–2121.
24. Regulation (EC) No 850/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on persistent organic pollutants and amending Directive 79/117/EEC. *Official Journal of the European Communities*, 30.4.2004, L 158, pp. 7–49.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004R0850> (date of access: 02/05/2023).
25. Sakai, S.-I., Hiraoka, M. Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes. *Waste Management*, 2000, vol. 20, no. 2–3, pp. 249–258.
26. Testing of Residues from Incineration of Municipal Solid Waste: Science report P1–494/SR2 / Environment Agency, UK, 2004, 126 pp.
URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/290379/scho0105bjb-e-e.pdf (date of access: 02/05/2023).
27. Traina, G., Morselli, L., Adorno, G.P. Electrokinetic remediation of bottom ash from municipal solid waste incinerator. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 52, no. 10, pp. 3380–3385.
28. Vehlow, J., Bergfeldt, B., Hunsinger, H. PCDD/F and related compounds in solid residues from municipal solid waste incineration — a literature review. *Waste Management & Research*, 2006, vol. 24, no. 5, pp. 404–420.
29. Wong, S., Mah, A.X.Y., Nordin, A.H., et al. Emerging trends in municipal solid waste incineration ashes research: a bibliometric analysis from 1994 to 2018. *Environmental Science & Pollution Research*, 2020, vol. 27, no. 8, pp. 7757–7784.
30. Xiao, Y., Oorsprong M., Yang, Y., Voncken, J.H.L. Vitrification of bottom ash from a municipal solid waste incinerator. *Waste Management*, 2008, vol. 28, no. 6, pp. 1020–1026.
31. Xie, R., Xu, Y., Huang, M., Zhu, H., Chu, F. Assessment of municipal solid waste incineration bottom ash as a potential road material. *Road Materials & Pavement Design*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 992–998.
32. Zhang, H., He, P.-J., Shao, L.-M., Li, X.-J. Leaching behavior of heavy metals from municipal solid waste incineration bottom ash and its geochemical modeling. *Journal of Material Cycles & Waste Management*, 2008, vol. 10, no. 1, pp. 7–13.

BOTTOM ASH FROM MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION: COMPOSITION, LEACHING OF HEAVY METALS, TREATMENT, POSSIBILITIES OF APPLICATION AND PERMISSIBILITY OF BURIAL

T. I. Yuganova^{a, #}, V. S. Putilina^{a, ##}

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

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

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

The most important problem that arises when handling bottom ash from municipal solid waste incineration, due to possible environmental pollution, is considered. The composition, chemical properties and mineralogy of bottom ash are presented. Issues of pollutant leaching from bottom ash, leaching testing methods, and predictive modelling are considered. Heavy metals as the most hazardous pollutants for the environment have been studied. The role of pH and dissolved organic carbon in leaching heavy metals is described. Methods for processing bottom ash to reduce environmental impact, the possibilities of using slag and regulatory restrictions are presented.

Keywords: *bottom ash from MSW incineration, heavy metals, leaching, leaching testing, modelling, bottom ash treatment, bottom ash application*

О РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗЕМЕЛЬ, НАРУШЕННЫХ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ В КУЗБАССЕ, НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. А. Н. Соловицкий¹, *, Н. Ю. Никулин¹

¹Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, Кемерово, 650000 Россия

*E-mail: san.mdig@mail.ru

Поступила в редакцию 08.08.2023 г.

После доработки 02.10.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Обобщен опыт рекультивации нарушенных земель в Кузбассе. Установлена востребованность изучения пространственного распределения состава грунтов и их обводненности на техническом этапе проведения рекультивации. В сложившихся условиях возникает необходимость разработки новых методов рекультивации нарушенных земель, направленных на обеспечение дальнейшего развития отработанных участков. Цель исследований — разработка метода рекультивации земель, нарушенных горными работами в Кузбассе, на основе применения прикладных геофизических технологий на примере разреза “Талдинский угольный разрез”. Зонирование отработанного участка проводится на основе интерпретации результатов прикладных малоглубинных геофизических технологий о состоянии грунтов и их обводненности, что обеспечивает новый уровень информационного взаимодействия между техническим и биологическим этапами рекультивации. Практическое использование указанного метода заключается в расширении возможностей рекультивации нарушенных земель для развития рационального природопользования.

Ключевые слова: рекультивация, нарушенные земель, зонирование, прикладные малоглубинные геофизические технологии, интерпретация

DOI: 10.31857/S0869780924010115, EDN: GNFOZS

ВВЕДЕНИЕ

Ресурсная направленность экономики Кузбасса уязвима с экологических и санкционных позиций [2]. Стремление снизить затраты на добычу угля недропользователями обуславливает ведение горных работ открытым способом, что не является лучшим вариантом для экологии региона. Открытый способ добычи угля отягощен не только загрязнениями окружающей среды, но и образованием “нарушенных” земель, для введения в оборот которых требуется их рекультивация. В Российской Федерации сложилось несколько научных школ рекультивации нарушенных земель (РНЗ), одна из которых сформирована в Кемеровском государственном университете [3–9, 12, 14, 15]. Эта научная школа широко применяет как традиционные методы РНЗ в Кузбассе [9, 12], так инновационные технологии [5]. Однако, несмотря на значительные успехи в области проведения РНЗ, ее оптимизация далека от совершенства. Снижение затрат на проведение РНЗ ориентирует недропользователей в Кузбассе на выбор лесотехнического направления, которое нацелено чаще на высадку малолетних, но неприхотливых растений [9, 12]. Поэтому результатом такого проведения РНЗ является перевод земель промышленности в лесные, но с их низкой кадастровой

стоимостью. Для повышения кадастровой стоимости рекультивируемых земель и обеспечения их вклада в развитие территорий, авторами предлагается высадка ценных пород деревьев, что предполагает дальнейшее их народно-хозяйственное использование. Для высадки ценных пород деревьев необходимо знание состава грунтов и их обводненности.

Авторами предлагается проведение зонирования отработанных участков после технического этапа РНЗ на основе геофизического метода путем применения прикладных малоглубинных геофизических технологий (ПМГТ), которые в горном деле разнообразны и широко используются [1, 10, 11, 13]. Однако применение таких технологий при проведении РНЗ недостаточно изучено. По мнению авторов, ПМГТ в Кузбассе могут найти более широкое применение и использоваться не только при проведении технического этапа РНЗ, но и быть нацелены на совершенствование второго (биологического) этапа.

Цель исследования — разработка метода рекультивации земель, нарушенных горными работами в Кузбассе, на основе их зонирования с помощью прикладных малоглубинных геофизических технологий на примере разреза “Талдинский угольный разрез”. Авторы считают, что проблемная ситуация

заключается в том, что, несмотря на использование инновационных технологий, применяемых на биологическом этапе рекультивации, на техническом этапе отсутствуют эффективные методики изучения рекультивационного слоя для установления необходимого индекса лесорастительных условий и профилактических мер по применению почвоулучшителей [9, 12]. Разработка методов изучения рекультивационного слоя на первом этапе и его зонирование для оптимизации биологического этапа — это важная научная задача. Все перечисленное выше свидетельствует об актуальности темы исследований и её научном и практическом интересе.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве научно-методической основы нового подхода предлагается использовать метод зонирования, профилактической мерой которого является следующий критерий [11]:

$$NP[t] > NP_f[t_0], \quad (1)$$

где $NP[t]$ и $NP_f[t_0]$ — последствия негативных процессов и явлений на исследуемой территории на периоды t и t_0 до и после рекультивации соответственно.

Для снижения последствий негативных процессов и явлений на исследуемой территории при проведении зонирования на основе ПМГТ, авторами предложен критерий

$$A[t] > A_f[t_0], \quad (2)$$

где $A[t]$ — геофизические аномалии исследуемого месторождения на эпоху t ; $A_f[t_0]$ — фоновые

геофизические аномалии исследуемого месторождения на эпоху t_0 .

Задачи исследования:

- установить проблемную ситуацию РНЗ;
- разработать метод рекультивации земель, нарушенных горными работами в Кузбассе, на основе применения ПМГТ;
- отразить реализацию применения ПМГТ на конкретном примере.

Экспериментальные исследования по реализации зонирования для обеспечения оптимизации РНЗ в Кузбассе на основе применения ПМГТ проведены авторами в рамках проекта “Экополигон мирового уровня технологий рекультивации и ремедиации”, реализуемого Кемеровским государственным университетом совместно с индустриальным партнером АО “Кузбассразрезуголь”, на участке отвалов вскрышных пород разреза “Талдинский угольный разрез”, расположенный вблизи села Большая Талда Прокопьевского муниципального района Кемеровской области.

Экспериментальные исследования включали:

- георадиолокационное профилирование грунтов;
- вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) грунтов.

Георадиолокационное профилирование грунтов проведено по системе параллельных продольных профилей 1–3, расположенных по падению откоса отвала вскрышных пород. Схематичное расположение профилей и их направление представлено на рис. 1. Сканирование осуществлялось аппаратурой ОКО-2 (ООО “ЛогиС”) с антенным блоком

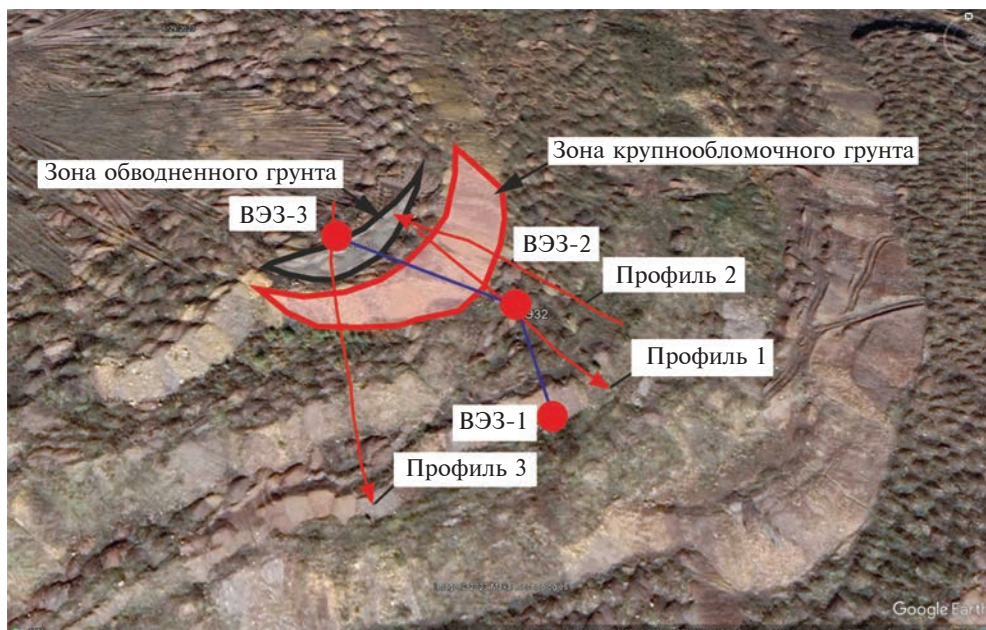


Рис. 1. Схема расположения профилей и зонирования: профили 1, 2, 3 — георадиолокационного профилирования грунтов; ВЭЗ-1, 2, 3 — профили вертикального электрического зондирования.

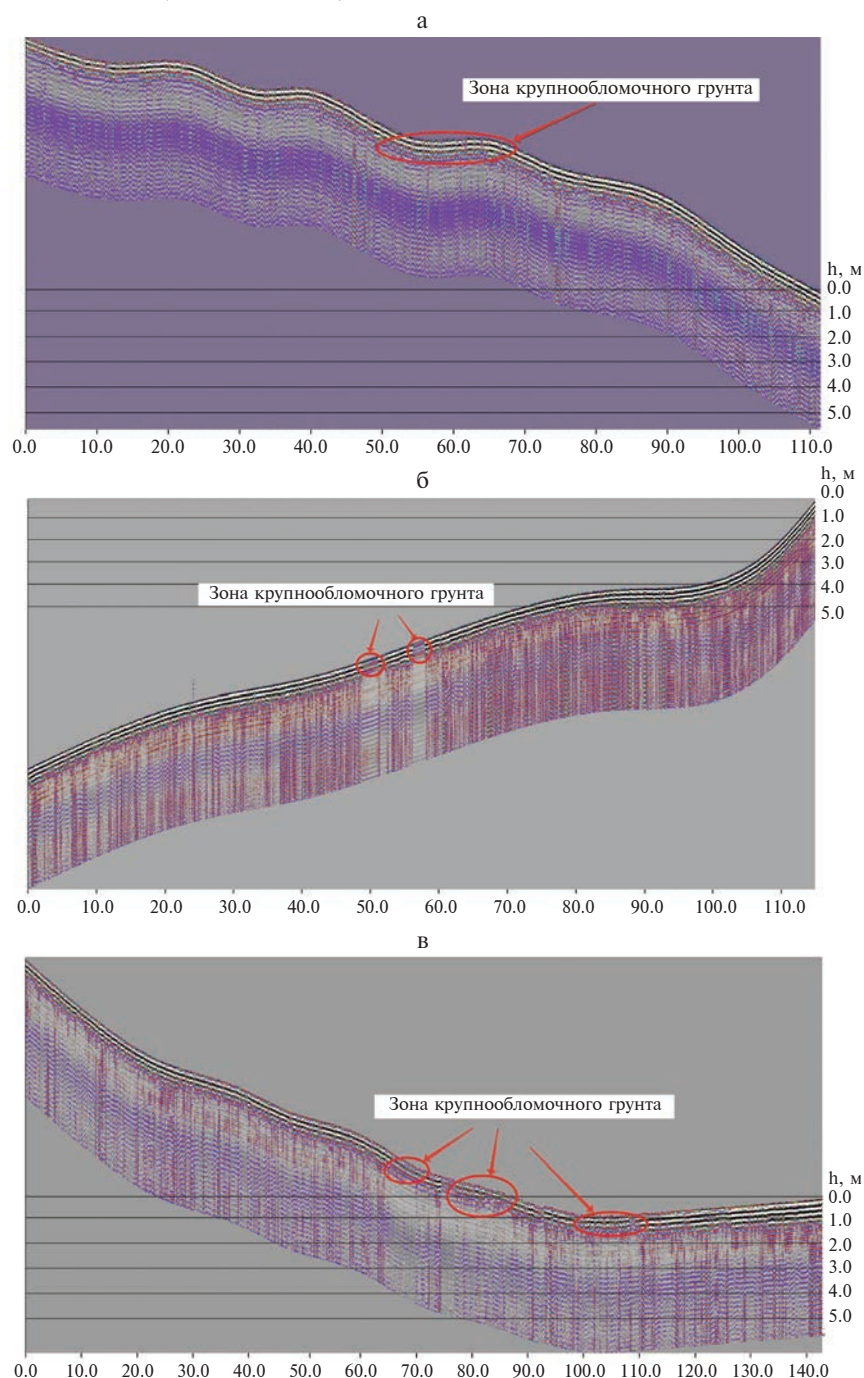


Рис. 2. Радарограммы по профилю: а — 1, б — 2, в — 3.

АБ-400 на частоте 400 МГц. Глубина зондирования зависела от электрофизических свойств изучаемой среды и частоты зондирующего сигнала, что для данного типа антенного блока и состава грунтового массива с диэлектрической проницаемостью ~ 7 составила 5 м. Линейная горизонтальная развертка георадиолокационных данных производилась по датчику пути при заданной плотности съемки 10 пк/м. Рабочий временной диапазон был принят 90 нс, 512 временных отчетов в линейной шкале.

Длина профилей контролировалась колесным датчиком пути, входящим в состав георадара. Для интерпретации данных георадиолокационной съемки использовалась измерительная программа Geoscan32 v2.3 b4 (ООО «Логис»). Geoscan32 позволяет производить усиление сигнала, частотную фильтрацию с целью подавления помех. Также применялись различные цветовые схемы для улучшения визуализации, и производилась корректировка глубины исследований путем назначения эффективной диэлектрической проницаемости

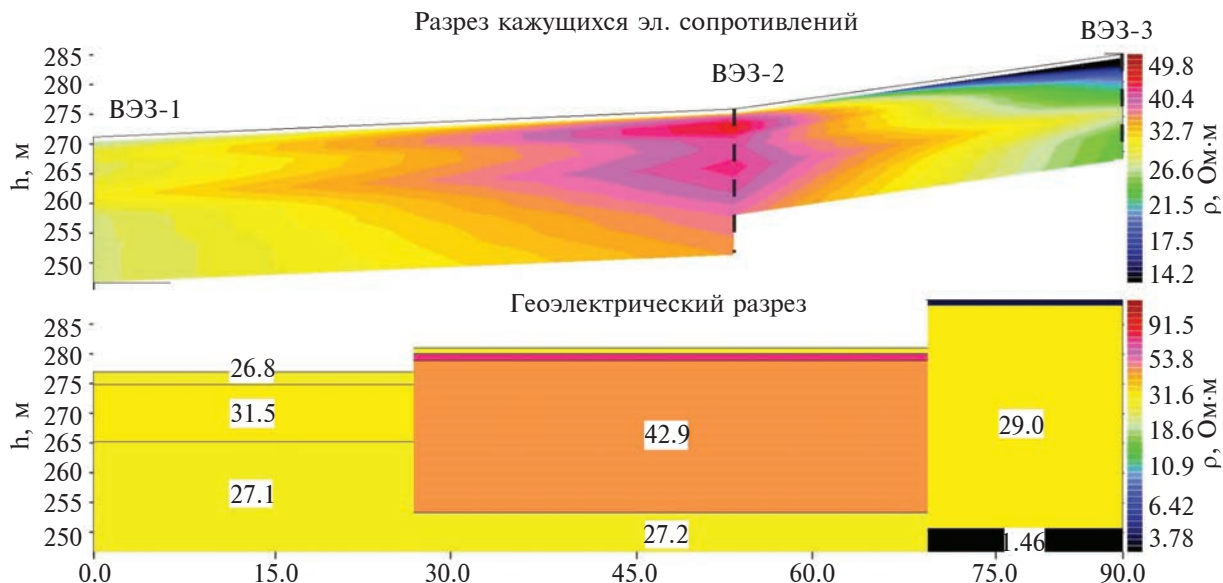


Рис. 3. Геоэлектрический разрез ВЭЗ-1–2–3.

для грунтового массива. Диэлектрическая проницаемость для насыпных грунтов по справочным данным принималась, равной 7 [9].

Расположение точек ВЭЗ выбиралось исходя из возможности выполнения заземления при разносах питающей линии АВ, равной 110 м. Таким образом, зондирование осуществлялось приближенно к осевой части экополигона в трех точках ВЭЗ, равномерно расставленных в верхней, средней и нижней части откоса. В качестве измерительной аппаратуры использовался электроразведочный комплекс “Березка”, состоящий из приемника ЭРП-5 и генератора ЭРГ-5. Заземление приемной линии осуществлялось электродами из нержавеющей стали на глубину до 20 см, питающая линия заземлялась стальными электродами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метод рекультивации земель, нарушенных горными работами в Кузбассе, на основе применения ПМГТ включает:

- методику изучения состава грунтов после их механической обработки;
- методику изучения обводненности грунтов для обеспечения питания высаживаемых растений.

Методики изучения состава грунтов и их обводненности базируются на результатах интерпретации георадиолокационного профилирования и вертикального электрического зондирования грунтов.

Интерпретация георадиолокационного профилирования грунтов свидетельствует о следующем. Оценка сложения грунтового массива осуществлялась по форме осей синфазности. Участки, на которых оси синфазности теряют корреляцию [1], считаются аномальными, связанными с разуплотнением грунтов массива. На рис. 2 показаны радарограммы по профилям 1–3, где стрелкой обозначен участок с нарушением корреляции осей синфазности, что обусловлено разуплотнением грунтов на данном участке.

Грунт низкой плотности по всем исследуемым профилям располагается от дневной поверхности на глубине до 1 м. По профилю 1 такая аномальная зона зафиксирована на участке от 50 до 70 м от начала профиля, по профилю 2 от 47 до 60 м, по профилю 3 от 63 до 112 м. Таким образом, разуплотнения встречены преимущественно в средней части экополигона.

Направление разносов питающих линий ВЭЗов выбиралось вдоль простираения откоса, так чтобы соблюдалось требование заземления электродов А и В с разницей в абсолютных отметках земли, не превышающей 5–10%. Зондирование осуществлялось симметричной 4-электродной установкой Шлюмберже при разносе АВ до 110 м, что позволило достичь глубины исследования до 25–35 м в зависимости от состава исследуемой грунтовой толщи. Обработка полевых данных выполнялась в программе IPI2win, где осуществлялось построение кривых ВЭЗ, их инверсия и объединение в геоэлектрический разрез ВЭЗ-1–2–3 (рис. 3).

Анализ результатов ВЭЗ грунтового массива свидетельствует о следующем. Как видно из приведенного геоэлектрического разреза, средняя часть профиля (точка ВЭЗ-2) в диапазоне исследуемых глубин 0,9–27,6 м представлена грунтом с повышенным удельным электрическим сопротивлением (УЭС) 43–67 Ом·м, ниже по разрезу залегает грунт с фоновым УЭС 27 Ом·м. Периферийная часть исследуемого профиля представлена грунтами с УЭС 26–32 Ом·м, что тоже является относительно фоновым значением УЭС. В точке ВЭЗ-3 с глубины 38,3 м отмечено резкое снижение УЭС до значений 1,46 Ом·м, что предположительно связано с насыщением грунтового массива подземными водами.

Согласно выполненным авторами исследований, установлено:

– наличие зоны насыщения грунтового массива подземными водами, в которой высаживаемые растения обеспечены питанием (см. рис. 1);

– выделение в средней части площадки грунтов зоны с повышенным УЭС до 67 Ом·м (см. рис. 1), так как на данном участке залегает крупнообломочный грунт до глубины 27,6 м, что влияет на индекс лесорастительных условий, т.е. на биологическом этапе рекультивации земель потребуются применение почвоулучшителей [12];

Ввыделение зон обводненности и крупнообломочных грунтов подтверждено бурением скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы.

1. Авторами предложен новый подход к РНЗ на ее техническом этапе, основанный на применении ПМГТ на отработанном участке, обеспечивающий изучение рекультивируемого слоя и выбор соответствующего индекса лесорастительных условий.

2. Установлено, что интерпретация результатов применения ПМГТ на ее техническом этапе является оперативным, точным и высоко автоматизированным методом при трансформировании земель.

3. Разработанный авторами метод РНЗ в Кузбассе на основе применения ПМГТ на ее техническом этапе — это не только инструмент **защиты от опасных техногенных воздействий, но и рационального землепользования и** решения экологических задач развития территорий.

Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла “Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков

для жизни населения”, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобачев А. А., Большаков Д. К., Модин И. Н., Шевнин В. А. Электроразведка. Т. II. Малоглубинная электроразведка. М.: МГУ, 2013. 123 с.
2. Власюк Л. И. Стратегический приоритет экологизации экономики Кузбасса: фонд рекультивации земель // Управленческое консультирование. 2021. № 2. С. 69–78.
3. Двуреченский В. Г., Середина В. П. Характеристика почвенного покрова техногенных ландшафтов Красногорского каменноугольного разреза // Вестник ТГУ. 2014. № 387. С. 257–265.
4. Ермак Н. Б., Русин Е. В. Оценка жизненного состояния лесных насаждений рекультивированных участков отвалов предприятий угледобычи // Вестник КемГУ. 2010. № 1 (41). С. 38–41.
5. Заушинцева А. В., Кожевников Н. В. Биорекультивационное районирование Кузбасса // Вестн. КемГУ. 2015. Т. 2. № 1–2 (61). С. 20–25.
6. Коваленко В. С., Штейнцвайг Р. М., Голик Т. В. Рекультивация нарушенных земель на карьерах. М.: Изд-во “Горная книга”, 2012. 65 с.
7. Кожевников Н. В., Заушинцева А. В. Отечественный и зарубежный опыт биологической рекультивации нарушенных земель. // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Биологические, технические науки и науки о Земле. 2017. № 1. С. 43–47.
8. Наумов И. В. Исследование пространственных диспропорций в процессах нарушения и рекультивации земельных ресурсов в России // Известия УГГУ. 2019. Вып. 4 (56). С. 142–151.
9. Осинцева М. А., Бурова Н. В., Жидкова Е. А. Особенности рекультивации отработанных территорий угольных разрезов в Кузбассе // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 9 (123). С. 1–12.
10. Соловицкий А. Н., Никулин Н. Ю., Смирнов Н. А. и др. Геофизические исследования в Кузбассе // Наука, инновации, образование: актуальные вопросы и современные аспекты: монография / Под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. Пенза: МЦНС “Наука и Просвещение”. 2022. С. 196–205.
11. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.
12. Уфимцев В. И. Опыт и современное состояние лесной рекультивации в Кузбассе // Сибирский лесной журнал. 2017. № 4. С. 12–27
13. Федоров М. Ю., Федоренко Е. А., Соловицкий А. Н. Контроль сложных горно-геологических условий освоения угольного месторождения ООО “Шахта имени С. Д. Тихова” // Сб. ст. XXXI Междунар. научно-практ. конф. “Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации”. В 2 ч. Ч. 1. Пенза: МЦНС “Наука и Просвещение”. 2023. С. 199–203.
14. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: Review of content and

- comparative law and feasibility study // Resources. 2020. V. 9. № 6. P. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/RESOURCES9060073>
15. Podurets O. I., Osintseva M. A. Ecological aspect of the development of soil-forming processes at the post-technogenic stage. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2021. V. 937. № 2. P. 022008.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022008>.

ON THE RECLAMATION OF LAND DISTURBED BY MINING IN KUZBASS USING APPLIED GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

A. N. Solovitskii^{a, #}, N. Yu. Nikulin^a

^aKemerovo State University, ul. Krasnaya 6, Kemerovo, 650000 Russia

[#]E-mail: san.mdig@mail.ru

The experience in reclamation of disturbed lands in Kuzbass is summarized. The demand for studying the spatial distribution of soil composition and water content in soil at the technical stage of land reclamation is shown. Currently, there is a need to develop new methods for the reclamation of disturbed lands, aimed at ensuring further development of depleted areas. The goal of research is to develop a method for reclamation of lands disturbed by mining operations in Kuzbass, based on the use of applied geophysical technologies by the example of the Taldinsky coal mine. The proposed method is based on the zoning of the mined-out area proceeding from the results of applied shallow geophysical survey on the state of soils and their water content, which provides a new level of information interaction between the technical and biological stages of reclamation. The practical use of this method is to expand the possibilities of reclamation of disturbed lands for the development of rational environmental management.

Keywords: *reclamation of disturbed lands, zoning, applied shallow geophysical technologies, interpretation*

REFERENCES

- Bobachev, A.A. Bol'shakov, D.K., Modin, I.N., Shevnin, V.A. [Electrical prospecting. Vol. II. Shallow electrical prospecting]. Moscow, MGU Publ., 2013, 123 p. (in Russian)
- Vlasyuk, L.I. [Strategic priority of ecologization of the economy in Kuzbass: land reclamation foundation]. Upravlencheskoe konsul'tirovanie, 2021, no. 2, pp. 69–78. (in Russian)
- Dvurechenskii, V.G., Seregina, V.P. [Characteristics of the soil cover of technogenic landscapes at the Krasnogorsk coal mine]. *Vestnik TGU*, 2014, no. 387, pp. 257–265. (in Russian)
- Ermak, N.B., Rusin, E.V. [Assessment of the vital state of forest plantations at re-cultivated sites of coal mining waste dumps]. *Vestnik KemGU*, 2010, no. 1 (41), pp. 38–41. (in Russian)
- Zaushintsena, A.V., Kozhevnikov, N.V. [Bioremediation zoning of Kuzbass]. *Vestnik KemGU*, 2015, vol. 2, no. 1–2 (61), pp. 20–25. (in Russian)
- Kovalenko, V.S., Shteintsig, R.M., Golik, T.V. [Recultivation of disturbed lands in open pits]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2012, 65 p. (in Russian).
- Kozhevnikov, N.V., Zaushintsena, A.V. [Domestic and foreign experience of biological reclamation of disturbed lands]. *Vestnik KemGU*, 2017, no. 1, pp. 43–47. (in Russian)
- Naumov, I.V. [Study of spatial disproportions upon the disturbance and reclamation of land resources in Russia]. *Izvestiya UGGU*, 2019, no. 4 (56), pp. 143–152. (in Russian)
- Osintseva, M.A. Burova, N.V., Zhidkova, E.A. [Peculiarities of reclamation of waste areas at coal mines in Kuzbass]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2022, no. 9 (123), pp.1–12. (in Russian)
- Solovitskii, A.N., Nikulin, N.Yu., Smirnov, N.A. et al. [Geophysical research in Kuzbass]. In: [Science, innovations, education: topical issues and modern aspects]. G. Yu. Gulyaev, Ed., Penza, ICNS "Science and Education", 2022, pp. 196–205. (in Russian)
- Starovoitov, A.V. [Interpretation of GPR data]. Moscow, MGU Publ., 2008. 192 p. (in Russian)
- Ufimtsev, V.I. [Experience and current state of forest reclamation in Kuzbass]. *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, no. 4, pp. 12–27. (in Russian)
- Fedorov, M.Yu., Fedorenko, E.A., Solovitskii, A.N. [Control of complex mining and geological conditions for the development of a coal deposit LLC "Mine named after S. D. Tikhov"]. In: [Collection of articles of the XXXI International Scientific and Practical Conference "Modern Science: Current Issues, Achievements and Innovations". Part 1]. Penza, ICNS "Science and Education", 2023, pp. 199–203. (in Russian)
- Ignatyeva, M., Yurak, V., Pustokhina, N. Recultivation of post-mining disturbed land: Review of content and comparative law and feasibility study. *Resource*, 2020, vol. 9, no. 6, p. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/RESOURCES9060073>
- Podurets, O.I., Osintseva, M.A. Ecological aspect of the development of soil-forming processes at the post-technogenic stage. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, vol. 937, no. 2. p. 022008.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022008>.