

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2021

Аммонийный азот в фильтрате полигонов ТКО: образование, трансформация, долгосрочность загрязнения

И. В. Галицкая, В. С. Путилина, Т. И. Юганова

3

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века

В. П. Мельников, В. И. Осипов, А. В. Брушков, С. В. Бадина, Д. С. Дроздов, В. А. Дубровин, М. Н. Железняк, М. Р. Садуртдинов, Д. О. Сергеев, Н. А. Остарков, А. А. Фалалеева, Я. Ю. Шелков

14

Изменение структуры области деформаций подрабатываемой толщи горных пород при одноуровневой многокамерной отработке соляной залежи

Ю. А. Мамаев, А. Н. Власов, М. Г. Мнушкин, П. В. Стольникова

32

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Фитогенный псевдокарст и условия его формирования

А. А. Лаврусевич, Т. А. Цуцупа, В. А. Салдин, И. А. Лаврусевич

39

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

Методологические принципы оценки геологической среды для размещения объектов обращения с ТКО

И. В. Козлякова, И. А. Кожевникова, О. Н. Еремина, Н. Г. Анисимова

48

Правовой подход к решению проблем управления и геоэкологической безопасности хранения коммунальных отходов в странах ЕС

И. Н. Заиканова

59

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях

Ф. С. Карпенко, В. Н. Кутергин, С. И. Фролов, Р. В. Собин

69

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Фоновые концентрации элементов в почвах бассейна реки Подкаменная Тунгуска

А. Р. Митев, Р. А. Шарафутдинов

79

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сравнительная оценка возможностей дешифрирования экзогенных геологических процессов с помощью аэро- и космической съемки на основе геоинформационного моделирования (применительно к мониторингу линейных сооружений)

Т. В. Орлов, А. В. Зверев, В. В. Бондарь

88

Contents

Number 1, 2021

Ammonium nitrogen in the leachate of MSW landfills: formation, transformation, and long-term pollution

I. V. Galitskaya, V. S. Putilina, T. I. Yuganova

3

FUNCTIONING OF NATURAL AND NATURAL ANTHROPOGENIC SYSTEMS

Damage assessment for residential and industrial buildings and structures due to temperatures change and permafrost thawing in the Arctic zone of the Russian Federation by the middle of the XXI century

*V. P. Melnikov, V. I. Osipov, A. V. Brouchkov, S. V. Badina,
D. S. Drozdov, V. A. Dubrovin, M. N. Zheleznyak, M. R. Sadurtdinov,
D. O. Sergeev, N. A. Ostarkov, A. A. Falaleeva, Y. Yu. Shelkov*

14

Changing structure of deformation area of undermined rock layer upon one-layer multichamber mining of salt deposit

Yu. A. Mamaev, A. N. Vlasov, M. G. Mnushkin, P. V. Stol'nikova

35

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Phytogenic pseudokarst and conditions of its formation

A. A. Lavrusevich, T. A. Tsutsupa, V. A. Saldin, I. A. Lavrusevich

39

WASTE DISPOSAL

Methodological principles of assessing geoenvironment for allocation of municipal solid waste management facilities

I. V. Kozliakova, I. A. Kozhevnikova, O. N. Eremina, N. G. Anisimova

48

Legal approach to management and ensuring safe disposal of municipal waste in EU countries

I. N. Zaikanova

59

SOIL AND ROCK ENGINEERING

The influence of variations in hydrate film properties on the strength of clay soils upon thermal impacts

F. S. Karpenko, V. N. Kutergin, S. I. Frolov, R. V. Sobin

69

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Background concentrations of trace elements in soils of the Podkamennaya tunguska river basin

A. R. Mitev, R. A. Sharafutdinov

79

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Comparative estimation of possibilities of delineation of geohazards using airborne and satellite images (pipeline case study)

T. V. Orlov, A. V. Zverev, V. V. Bondar

88

УДК 550.424628.4

АММОНИЙНЫЙ АЗОТ В ФИЛЬТРАТЕ ПОЛИГОНОВ ТКО: ОБРАЗОВАНИЕ, ТРАНСФОРМАЦИЯ, ДОЛГОСРОЧНОСТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2021 г. И. В. Галицкая^{1,*}, В. С. Путилина^{1,**}, Т. И. Юганова^{1,***}

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

*E-mail: galgeoenv@mail.ru

**E-mail: vputilina@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 22.10.2020 г.

После доработки 22.10.2020 г.

Принята к публикации 05.11.2020 г.

В настоящей статье на основании анализа отечественной и зарубежной литературы проведено исследование вопросов, связанных с продолжительностью выделения аммонийного азота из твердых коммунальных отходов в свалочный фильтрат, форм нахождения азота в фильтрате, процессов связывания и преобразования NH_4^+ в свалочном теле. Рассмотрены механизмы обратимой и необратимой сорбции иона аммония, приведены значения коэффициентов его распределения для различных горных пород. Проанализированы процессы трансформации NH_4^+ в аэробных и анаэробных условиях, в том числе недавно установленный процесс анаэробной микробиальной реакции окисления NH_4^+ нитритом, названной “анаммокс” и выполняющей важную роль в биологическом цикле азота. Процессы образования и трансформации NH_4^+ на свалках и полигонах ТКО наглядно прослежены на примере утилизации отходов в аэробных и анаэробных свалках-биореакторах.

Ключевые слова: полигон ТКО, фильтрат, аммоний, нитрат, нитрит, загрязнение, подземные воды, свалка-биореактор, долгосрочность эмиссии

DOI: 10.31857/S0869780921010021

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на новые прогрессивные методы утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО), во многих странах по-прежнему преобладает захоронение отходов на свалках и полигонах; таким образом, проблемы загрязнения природных сред на участках расположения данных объектов остаются чрезвычайно актуальными. В настоящее время все больший интерес вызывают вопросы, связанные с продолжительностью влияния закрытых полигонов и свалок. Один из наиболее острых аспектов – длительность загрязнения свалочного фильтрата как источника воздействия на качество водных систем на участках размещения свалок и полигонов ТКО.

Как известно, свалочный фильтрат содержит значительное количество загрязняющих веществ, в том числе и высокотоксичных. В предыдущей статье [14] на основании анализа отечественных и зарубежных литературных источников проведено исследование длительности выщелачивания металлов из свалочного тела, изменения их подвиж-

ности в аэробных и анаэробных условиях и форм связывания в твердой фазе. Сделан вывод, что риск поступления металлов в подземные воды после прекращения эксплуатации полигона ТКО минимален. В отличие от этого, как следует из многих публикаций, концентрации другого важнейшего компонента фильтрата – аммонийного азота – в свалочном фильтрате остаются очень высокими в течение длительного периода.

Аммоний, как правило, присутствует в свалочных фильтратах в весьма значительных концентрациях, что является одной из основных причин токсичности фильтрата [19, 23, 32]. Неорганический азот в форме аммиака (NH_3) и иона аммония (NH_4^+) признан одним из наиболее распространенных загрязнителей подземных вод, образующихся в результате деятельности по удалению отходов [7]. Учитывая его подвижность при определенных условиях, аммоний обычно рассматривается как основной компонент загрязнения при оценке риска загрязнения водных систем на участках расположения свалок и полигонов [16].

Таблица 1. Концентрации аммония в свалочных фильтратах (все значения получены для старых свалок в метаногенной фазе) [19]

Аммоний-N, мг/л	Описание и ссылка
110	Средняя концентрация аммония для 104 старых свалок, Дания [18]
233	Сводные результаты для свалки Sandsfarm, Великобритания [28]
282	Сводные результаты для свалки Bishop Middleham, Великобритания [28]
399	Сводные результаты для свалки Odsal Wood, Великобритания [28]
43	Сводные результаты для свалки East Park Drive, Великобритания [28]
30	Сводные результаты для свалки Marton Mere, Великобритания [28]
12–1571	Диапазон концентраций для 21–30-летних свалок, Германия [20]
445	Средняя концентрация для 21–30-летних свалок, Германия [20]
740	Средняя концентрация [12]

В последние годы внимание обращается также на органический азот, который признан опасным компонентом водной среды. Результаты исследований показали, что биологически очищенный свалочный фильтрат содержит до 60 мг/л органического азота, и что в свалочном фильтрате органический азот является более биостойким, чем другие органические вещества [35, 36].

В данной статье рассматриваются вопросы продолжительности выделения аммония из твердых коммунальных отходов в фильтрат, форм нахождения азота в свалочном фильтрате, процессов связывания и преобразования аммония в свалочном теле. Исследование проводилось на основании анализа отечественной и зарубежной литературы.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ АММОНИЯ ИЗ СВАЛОЧНОГО ТЕЛА

Исследованиям продолжительности выделения аммония из ТКО, приводящего к загрязнению свалочного фильтрата, посвящены многочисленные публикации, однако тенденции уменьшения концентрации аммонийного азота в фильтратах выявлены далеко не во всех работах.

По данным, приведенным в [19], во многих случаях концентрации аммонийного азота в фильтратах очень высоки, могут достигать 2000 мг/л, и тенденции к снижению концентрации со временем не наблюдается. Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют, что концентрации аммония остаются высокими даже в фильтрате с более старых свалок. В исследовании 50 полигонов Германии содержание аммонийного азота не показало значительного снижения через 30 лет после закрытия полигона [20]. По данным [12], в период от кислой до метаногенной фазы значительные изменения концентрации аммония отсутствовали, среднее значение составляло 740 мгN/л.

При исследовании 43 полигонов Финляндии отмечалось, что концентрации аммонийного азо-

та немного увеличились через 30 лет после закрытия [1].

В отличие от вышеприведенных примеров, результаты исследований [29, 34] позволяют судить о возможном снижении концентрации аммонийного азота с увеличением продолжительности депонирования отходов и об ориентировочном времени достижения концентраций, не представляющих опасности для окружающей природной среды.

Результаты определения содержания аммонийного, нитритного и нитратного азота в отходах разного срока захоронения на четырех объектах Пермского края [34] показали, что с увеличением продолжительности депонирования отходов в водной вытяжке отмечается снижение концентраций аммонийного и нитритного азота, хлорида, значений ХПК, БПК₅, сухого остатка наряду с увеличением содержания в отходах нитратного азота (рис. 1).

По мнению авторов, высокие концентрации аммонийного азота в отходах со сроком захоронения 2–6 лет объясняются процессами биодеструкции легкоразлагаемых фракций ТКО с образованием жирных кислот, аминокислот, глицерина, полисахаридов, аммиака. Уменьшение содержания нитритного азота связано с замедлением процессов денитрификации отходов и их переходом в нитраты, а низкое содержание нитритного азота в отходах с продолжительностью депонирования более 30 лет свидетельствует о стабилизации биохимических процессов разложения отходов и завершении процессов денитрификации.

В статье [29], посвященной оценке долгосрочных эмиссий объектов захоронения ТКО, отмечается, что срок достижения приемлемых концентраций ионов аммония в фильтрате полигонов составляет 110–140 лет.

Ряд интересных результатов об особенностях изменения содержания аммонийного азота полу-

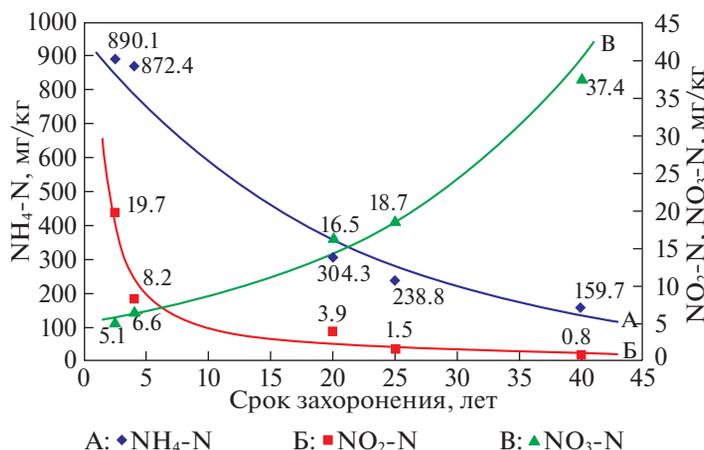


Рис. 1. Изменение содержания аммонийного, нитритного и нитратного азота в отходах разных сроков захоронения [34].

чен при исследовании форм азота в свалочном фильтрате на полигоне в шт. Кентукки (США) [36]. Полигон состоял из восьми отдельных секций. Секция 3 – неактивная (возраст 30 лет), она была закрыта и перестала принимать ТКО. Секции 5, 7 и 8 – действующие, со средним возрастом депонирования 16, 9 лет и 2.5 года соответственно. Секция 5 была выбрана для исследования в качестве “свалки-биореактора”, т.е. осуществлялась рециркуляция фильтрата с возможным добавлением жидкости: нитрифицированный фильтрат, промышленные жидкости, дренажные воды и т.д. Секция 7 использовалась как “контроль” без добавления жидкости. Секция 8 была построена после исследования “свалки-биореактора”.

Концентрации общего азота и различных форм азота в необработанных и обработанных образцах фильтрата представлены в табл. 2 (в обозначение образца включен номер секции).

Во всех необработанных фильтратах были обнаружены значительные количества аммонийного азота в качестве преобладающей формы и незначительное содержание нитрата и нитрита. Неорганические формы аммонийного азота образовались в результате восстановления нитратов, поступивших в свалку, а также ферментации органических веществ, в основном, протеинов. Концентрации аммонийного азота составляли 1298 и 1310 мг/л в фильтратах из секций с возрастом депонирования 2.5 (KY-8) и 9 лет (KY-7) соответственно. В фильтратах из секций с возрастом депонирования отходов 16 (KY-5) и 30 (KY-3) лет эти концентрации значительно ниже – 509 и 492 мг/л. Снижение содержания аммонийного азота, в отличие от предыдущих исследований, было связано с разбавлением в результате обслуживания “свалки-биореактора”, поступлением атмосферных осадков и т.д.

Следует отметить, что при различных состояниях стабилизации в фильтратах было обнаружено значительное количество органического азота (рис. 2). Его концентрация в неочищенных фильтратах варьировала от 25 до 218 мг/л. Из-за высокого уровня аммония в необработанных образцах наблюдались большие вариации при определении общего азота и, следовательно, при определении органического азота. Азотсодержащее органическое вещество имело явную тенденцию к снижению с возрастом полигона, что аналогично поведению общего органического вещества, измеренного как общий органический углерод.

В большинстве свалочных фильтратов идентифицированы две основные категории органического азота: белковый органический азот и органический азот, полученный из гумусовых веществ. Белковый органический азот присутствовал, главным образом, в свежих фильтратах.

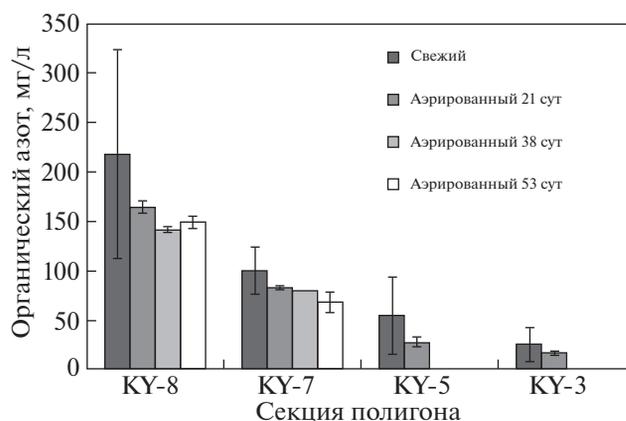


Рис. 2. Концентрация органического азота в свалочных фильтратах секций полигона в шт. Кентукки при различных состояниях стабилизации [36].

Таблица 2. Формы азота в свалочных фильтратах полигона в шт. Кентукки (США) в различных условиях [36]

Обозначение образца	Возраст секции, лет	Характеристика фильтрата	Концентрация вида азота, мг N/л				
			Общий азот	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Органический азот белков (по Лоури)
KY-8	2.5	Свежий	1462.7 ± 43.3	1297.5 ± 3.5	н.о. ^a	0.8	106.4
		Аэрированный 21 сут	189.0 ± 4.2	22.40 ± 1.6	0.9	1.1	62.9
		Аэрированный 38 сут	148.0 ± 2.8	4.54 ± 0.1	1.0	0.6	н.д. ^b
		Аэрированный 53 сут	227.0 ± 4.2	23.00 ± 1.0	4.8	0.5	н.д.
		Гидрофильная фракция	244.0 ± 13.4	94.1 ± 1.8	н.о.	0.4	71.7
KY-7	9	Свежий	1409.8 ± 24.4	1309.5 ± 2.1	н.о.	0.4	81.2
		Аэрированный 21 сут	93.0 ± 1.4	7.2 ± 0.2	3.0	0.3	33.9
		Аэрированный 38 сут	86.0 ± 0.0	2.3 ± 0.1	3.2	0.4	н.д.
		Аэрированный 53 сут	102.0 ± 2.8	6.1 ± 0.1	3.0	0.3	н.д.
		Гидрофильная фракция	53.8 ± 1.5	23.3 ± 0.4	н.о.	0.1	36.6
KY-5	16	Свежий	574.2 ± 24.5	509.0 ± 18.3	0.1	10.6	35.8
		Аэрированный 21 сут	33.5 ± 5.0	0.9 ± 0.0	1.1	4.1	22.5
		Гидрофильная фракция	41.0 ± 1.8	27.7 ± 0.4	0.0	3.9	23.6
KY-3	30	Свежий	516.6 ± 18.2	491.5 ± 2.1	н.о.	н.о.	16.7
		Аэрированный 21 сут	18.5 ± 2.1	1.4 ± 0.0	0.5	0.7	13.8
		Гидрофильная фракция	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	14.3

^a Не обнаружено.

^b Нет данных.

Считается, что его источником являются пищевые отходы. Возможный путь разложения белкового органического азота включает два этапа: гидролиз от белков до пептидов и аминокислот, затем аммонификация от аминокислот до ионного аммония. Поэтому выделение аммония из ТКО в фильтрат происходит медленнее, чем у легко растворимых соединений. Это частично объясняет относительно высокую концентрацию аммония в фильтрате из более старой секции полигона (KY-7).

Для лучшего понимания процессов, приводящих к изменению концентрации аммонийного азота в течение жизненного цикла свалочного тела, необходимы дальнейшие исследования, в том числе поведения различных видов органического азота в свалочных фильтратах.

ПРОЦЕССЫ СВЯЗЫВАНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АММОНИЯ

Процессы сорбции

Сорбция иона NH₄⁺ в основном осуществляется за счет катионообменных реакций на отрицательно заряженных минеральных поверхностях. В водных растворах с низким или нейтральным рН катионный обмен происходит главным образом на поверхностях глинистых частиц, но при

значениях рН выше нейтрального, значительный вклад также вносит сорбция на оксигидроксидах железа.

Относительная сила, с которой катионы связываются с заряженной минеральной поверхностью, определяется их коэффициентами селективности, которые являются функцией как минеральной поверхности, так и состава раствора. Относительную селективность в порядке уменьшения сродства к участкам катионного обмена можно представить как Al³⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > NH₄⁺ > K⁺ > H⁺ > Na⁺ [9].

В фильтрате полигонов ТКО ион NH₄⁺ — не самый распространенный катион. Доминирующий катион — это обычно натрий, который наряду с калием, кальцием и магнием, конкурирует с ионами NH₄⁺ за обменные участки. Значения коэффициентов распределения (*K_d*) иона аммония, определенные для одних и тех же пород, но различными методами (и особенно в разных по составу растворах) могут варьировать более чем на два порядка: например, для мела (Lower Chalk) *K_d* = 0–0.03 мл/г, юрской глины (Lias Clay) — 1.2–2.6 мл/г, валунной глины (Cohesive Boulder Clay) — 2–4 мл/г (табл. 3) [7]. В большинстве случаев миграцию иона NH₄⁺ определяет конкурентный катионный обмен [10]. Однако имеются подтвер-

ждения, что сорбция NH_4^+ не всегда происходит по механизму обмена. Например, сорбция NH_4^+ иллитом и другими глинистыми минералами типа 2:1 может быть фактически необратимым процессом, поскольку ион NH_4^+ поступает в состав внутрислойной глинистой матрицы. В отложениях со значительным содержанием иллита доля NH_4^+ , зафиксированного в межслоевом пространстве, обычно может составлять 20–40% от общего азота [6]. Глинистые отложения представляют собой важный “резервуар” ионов NH_4^+ , который может поддерживать устойчивое выделение этого поллютанта [10].

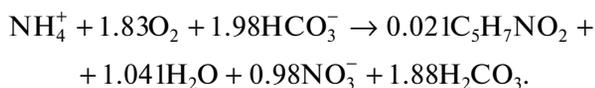
В табл. 3 представлены значения K_d из литературных источников в предположении, что осуществляется линейная модель сорбции. Эти значения считаются актуальными для ориентировочной оценки рисков, связанных с миграцией NH_4^+ в различных горных породах для разбавленных растворов.

Процессы трансформации

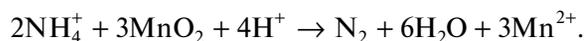
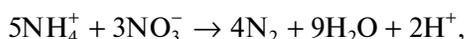
Аммоний может окисляться некоторыми бактериями для выработки энергии – процесс, известный как нитрификация. Нитрификация обычно проходит в две стадии, каждая из которых реализуется различными микроорганизмами-нитрификаторами:



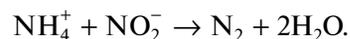
У нитрифицирующих бактерий углерод для биосинтеза обеспечивается растворенным CO_2 (в виде бикарбоната). Представляя химический состав микробной биомассы как $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$, две стадии нитрификации можно объединить для получения общей реакции [15]:



Процесс является *аэробным*, и потребление кислорода составляет около 3.3 кг O_2 на каждый килограмм деградировавшего аммонийного азота ($\text{NH}_4\text{--N}$). Это означает, что нитрификация требует постоянного поступления кислорода. Выход биомассы при нитрификации также низкий, около 0.13 кг/кг $\text{NH}_4\text{--N}$, т.е. рост нитрифицирующих бактерий будет медленным. Нитрификация также может происходить в *анаэробных условиях* с нитратом или оксидами марганца, действующими в качестве окислителя, например:



В 2002 г. [30] было доказано существование анаэробной микробальной реакции окисления NH_4^+ нитритом, названной “анаммокс” и выполняющей важную роль в биологическом цикле азота. Данная реакция проходит по уравнению:



Нитрит и нитрат, образующиеся при аэробной нитрификации NH_4^+ , подвержены биологическому разложению (денитрификации) до азота (N_2) в анаэробных условиях.

Нитрификация играет существенную роль в истощении NH_4^+ в зоне аэрации и в подземных водах. Этот процесс был отмечен при оценке загрязнения NH_4^+ на полигонах отходов [5] и при сбросе сточных вод [11]. В условиях, когда истощение за счет катионного обмена ограничено, например, при низком содержании глинистых минералов в водовмещающих породах, нитрификация может быть основным процессом, ограничивающим образование шлейфа NH_4^+ [8, 9].

В большинстве исследований нитрификация оценивалась в аэробных условиях. Однако, в [5] подчеркнута важность анаэробного окисления NH_4^+ . Авторы сообщили, что нитрификация была существенным процессом, управляющим истощением NH_4^+ в шлейфе свалочного фильтрата в песчано-гравийном водоносном горизонте в Дании, и показали значительный вклад анаэробного окисления NH_4^+ . Следует отметить, что другие натурные исследования свидетельствовали, что анаэробное окисление NH_4^+ происходит в незначительной степени [11, 17]. В связи с этим неясно, является ли оно существенным процессом истощения аммония для многих шлейфов фильтратов или этот процесс становится важным только в определенных условиях [7].

В водоносных горизонтах нитрификация может быть ограничена относительно низкой растворимостью кислорода в воде (максимум 10 мг/л при стандартных температуре и давлении) и физическим смешиванием путем дисперсии анаэробного шлейфа NH_4^+ с аэробными подземными водами. Согласно предположению, принятому в [11] и многих других исследованиях, разложение NH_4^+ является процессом первого порядка, который требует оценки параметра, соответствующего периоду полураспада. В исследовании [11] расчетная скорость нитрификации составила около 0.017 кг $\text{NH}_4\text{--N}$ /сут, что соответствует периоду полураспада около 13 сут при концентрации 27 мг $\text{NH}_4\text{--N}$ /л. Однако такие показатели, скорее всего, будут иметь место только в том случае, если высокие скорости биологического роста могут

Таблица 3. Коэффициенты распределения аммония для различных горных пород в Великобритании [7]

Литология ^а	Диапазон K_d , мл/г ^б	Комментарии
Мел Chalk	0–0.03	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы.
Триасовый песчаник Triassic Sherwood Sandstone	0–0.2–0.6	Приемлемая достоверность, поскольку было проведено несколько независимых тестов, хотя большинство значений получены только на одном участке (Burntstump).
Известняк Lincolnshire Limestone	0.065–0.65	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы.
Глауконитовый песок Lower Greensand “Hassock”	0.18–1.8	Низкая достоверность, поскольку не было получено никаких изотерм. Измерения проводились только по литологии “Hassock”. В общем, для Lower Greensand в качестве нижней границы следует использовать нуль.
Глауконитовый песок Lower Greensand (недифференцированный)	0–1.8	
Красный песчанистый мергель Red Crag	0.05–0.5	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы.
Каолинит Oxford Clay	0.135–1.35	На основе моделирования экспериментов в колонке.
Аргиллит Mercia Mudstone	0.5–5	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы.
Смектит Gault Clay	0.65–6.5	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы.
Юрская глина Lias Clay	1.2–2.6	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы.
Угольная глина Coal Measures Clay	0.18–1.8	На основе моделирования экспериментов в колонке с глинисто-песчаными смесями. Значение 1.8 мл/г получено для системы со 100% глины.
Песок и гравий, без прослоев	0–0.4–0.9	Приемлемая достоверность, поскольку было проведено несколько независимых тестов. Однако это, естественно, весьма неоднородная литология, поэтому следует использовать полную характеристику участка, если используется “глинистый” диапазон значений.
Песок и гравий, глинистые	0.4–0.9	
Валунная глина Cohesive Boulder Clay	2–4	Низкая достоверность, поскольку изотермы не идентифицированы. Валунная глина, естественно, представляет собой весьма неоднородную литологию, поэтому следует провести полную характеристику участка, и специалист по оценке риска должен быть вполне уверен, что в породе нет песчаных последовательностей.
Изолирующие глинистые слои полигонов отходов	0.1–0.5–5	Приемлемая достоверность, поскольку было проведено несколько независимых тестов, которые дают, по-видимому, последовательные результаты. Было показано, что K_d коррелирует с содержанием глины и/или ЕКО, поэтому допустим меньший консерватизм при подходящем тестировании и обосновании. Следует учитывать доминирующий глинистый минерал.

^а Значения считаются применимыми как к ненасыщенной, так и к насыщенной зоне.

^б Если приведены два значения для K_d , то для вероятностного моделирования предлагается равномерное распределение; там, где представлены три значения, предлагается треугольное распределение.

поддерживаться другими питательными веществами в смеси поллютантов. Значительно более низкие скорости нитрификации, которые можно ожидать в обычных условиях водоносного горизонта, были представлены в [13], где обсуждались скорости нитрификации, полученные из натуральных данных для двух шлейфов свалочного фильтра. Для полигона отходов Llwn Isaf в Северном Уэльсе была рассчитана аэробная нитрификация в неглубоком песчано-гравийном водоносном горизонте с периодом полураспада NH_4^+ около 6 лет. Данные, полученные по водоносному горизонту Sherwood Sandstone (песчаник) под полигоном Burntstump в Ноттингемшире, предполагают период полураспада близкий к 3.5 годам, хотя более поздние работы на этом же участке предлагали период полураспада 2.2 года [7].

Изучение пути миграции иона аммония в шлейфе коммунальных сточных вод с относительно низкой дисперсией и неактивной структурой водоносного горизонта показало, что окисление аммония ограничивалось узкими зонами бокового смешивания с насыщенными кислородом грунтовыми водами на границах шлейфа. Несколько более широкие зоны окисления NH_4^+ могут присутствовать вблизи фронта шлейфов в тех случаях, когда водоносные горизонты являются аэробными, а ионный обмен ограничен [9]. В целом, можно ожидать, что загрязнение NH_4^+ будет сохраняться в загрязненных субокисических водоносных горизонтах еще долгое время после того, как будут удалены более подвижные поллютанты [10].

ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ АММОНИЯ В СВАЛКАХ-БИОРЕАКТОРАХ

Процессы образования и трансформации аммония на свалках и полигонах наглядно могут быть прослежены на свалках-биореакторах.

Свалка-биореактор — это управляемая система, в которой используется добавление влаги (часто рециркуляция фильтрата) и/или нагнетание воздуха для создания в твердых отходах среды, способной активно разлагать легко биоразлагаемую органическую фракцию отходов. Одним из преимуществ является то, что повышенные темпы деградации отходов, характерные для свалки-биореактора, позволяют увеличить ее срок службы по сравнению с обычными полигонами. По мере рециркуляции фильтрата он обрабатывается *in situ*, в результате чего снижается органическая нагрузка и, следовательно, потенциальное воздействие на окружающую среду. Обработка *in situ* сокращает продолжительность периода обслуживания после закрытия полигона и связанные с этим расходы [3, 25]. Кроме того, нитрификация

аммония *in situ* более экономична и может происходить на более старых полигонах [4, 27].

Несмотря на то, что в свалках-биореакторах органическая нагрузка фильтрата значительно снижается, проблема загрязнения фильтрата аммонийным азотом остается. Его концентрация выше, чем в фильтрате с обычных полигонов, поскольку в свалках-биореакторах добавление влаги и/или рециркуляция фильтрата увеличивает скорость аммонификации [2, 3]. Традиционно удаление аммония из фильтрата часто проводилось *ex situ*. Однако обработка *ex situ* является трудной и дорогостоящей.

Процесс нитрификации—денитрификации *in situ* оказался более перспективным из-за его более низких эксплуатационных затрат и меньших требований к пространству. В процессе органической ферментации широко применяется двух-фазная обработка (фазы образования кислот и метановой ферментации). Микроорганизмы в этих фазах имеют разные скорости роста, оптимальные для окружающей среды и питания. Таким образом, оптимизация этих условий позволяет повысить производительность и степень стабилизации твердых отходов на полигонах в первые несколько лет.

На основе концепции разделения фаз в исследовании [21] в рамках экспериментальной свалки-биореактора были построены три реактора: 1) заполненный свежими отходами для бескислородной денитрификации и гидролиза, 2) для метаногенеза и 3) для аэробной нитрификации. В первом реакторе органическое вещество свежих отходов гидролизует и растворяется. Полученный фильтрат характеризуется как кислый с высоким содержанием органического вещества. Сначала этот фильтрат подается в метаногенный реактор для метаногенеза, а затем стоки поступают в нитрифицирующий реактор для окисления аммония до нитрата. В конечном итоге выходной поток возвращается в реактор анаэробной денитрификации и гидролиза.

Поскольку метаногенез не только производит достаточную щелочность для буферизации кислот, но и устраняет угрозу, которую гетерогенные бактерии представляют для нитрифицирующих бактерий в нитрифицирующем реакторе, очень важно поддерживать этот процесс, особенно на начальной стадии.

В метаногенном и нитрифицирующем реакторах используются выдержанные отходы. Они содержат широкий спектр и большое количество микроорганизмов, которые обладают значительной способностью к деградации труднорастворимых органических соединений, присутствующих в некоторых сточных водах [37]. При этом эффект рециркуляции фильтрата становится

максимальным, когда свалка достигает стабильной фазы [33].

Добавление воздуха в тело полигона улучшает процессы деградации отходов, поскольку аэробные процессы имеют тенденцию разлагать органические соединения за более короткие периоды времени, чем процессы анаэробной деградации. Описанные преимущества *аэробной эксплуатации полигона* включают увеличение оседания, снижение подвижности металлов, снижение затрат на управление составом фильтрата и контроль метана [3, 24].

Многие из процессов трансформации/удаления азота поддерживаются аэробными процессами, включая нитрификацию и вывод из системы (отвод) аммиака воздухом или улетучивание. Отвод воздухом и улетучивание могут быть предпочтительными в аэробных свалках-биореакторах из-за более высоких значений рН и температур, которые присущи аэробной среде.

Во время аэробной деградации ТКО биоразлагаемые материалы превращаются в основном в диоксид углерода и воду, при этом метана выделяется мало. Кроме того, в процессе анаэробной деградации устанавливаются нейтральные или слабощелочные значения рН, что снижает подвижность металлов [3, 24]. Образование летучих органических кислот в аэробных биореакторах достаточно низкое.

В *анаэробных свалках-биореакторах* практикуется добавление влаги. Источники добавления жидкости могут включать грунтовые воды, ливневые воды, инфильтрирующиеся атмосферные осадки или фильтрат. Повышение содержания влаги приводит к увеличению производства метана, что неоднократно демонстрировалось в различных лабораторных и натуральных исследованиях [31]. Поскольку в анаэробных биореакторах деградация отходов увеличивается и органические материалы возвращаются в тело отходов посредством рециркуляции фильтрата [25], метан образуется гораздо быстрее. Общий объем производимого газа также увеличивается, поскольку органические вещества фильтрата рециркулируются и затем биодеградируют в теле полигона. Большая часть производства газа может быть завершена несколькими годами ранее, чем это происходит на обычных полигонах, что обеспечивает более эффективный сбор и последующее использование газа [25].

Анаэробные свалки-биореакторы более эффективны для деградации твердых отходов, чем обычные полигоны. Однако по сравнению с другими типами свалок-биореакторов анаэробные системы имеют тенденцию к более низким температурам и более медленным темпам разложения. Недостатком эксплуатации анаэробной свалки-биореактора является накопление аммо-

нийного азота. В таких биореакторах аммонийный азот, присутствующий в фильтрате, постоянно возвращается в тело полигона. Преимущество анаэробной работы биореактора по сравнению с другими типами свалок-биореакторов состоит в том, что не требуется добавление воздуха; следовательно, эксплуатационные расходы меньше, чем были бы в аэробных условиях, и метан можно собирать и использовать [3].

Менее изученный, но перспективный тип свалки-биореактора – это *гибридный биореактор* [3], включающий сочетание аэробных и анаэробных условий. Были исследованы два типа таких систем: циклическое кратковременное нагнетание воздуха в тело полигона и последовательность аэробных и анаэробных условий.

Циклическое нагнетание воздуха в тело полигона определяется как чередование *in situ* аэробных и анаэробных условий, которое повторяется на протяжении всего жизненного цикла свалки-биореактора, тогда как последовательность нагнетания воздуха в отходы представляет собой начальную аэробную фазу, за которой следует конечная анаэробная фаза. Поскольку имеется много преимуществ, связанных как с аэробной, так и с анаэробной деградацией, исследователи видят в объединении этих процессов способ максимизировать потенциал свалки-биореактора. Существуют некоторые компоненты, как в отходах, так и в фильтрате, которые являются устойчивыми в анаэробных условиях, но разлагаются в аэробных средах, такие как лигнины и ароматические соединения. Использование одного из указанных гибридных методов может позволить более полно обрабатывать фильтрат и/или отходы [22, 26].

Использование гибридной свалки-биореактора может служить для объединения нескольких процессов трансформации и удаления азота, таких как нитрификация и денитрификация, потенциально приводящих к полному удалению азота с полигона. Проведено несколько лабораторных исследований по оценке влияния циклического нагнетания воздуха на производительность свалок-биореакторов [22]. Каждая из рассмотренных систем достигала биологически стабильного фильтрата по отношению к ХПК за более короткий период времени, чем для чисто аэробных систем. В нескольких исследованиях также оценивался эффект последовательной системы нагнетания воздуха [3]. В такой системе отходы размещаются по слоям. Первый слой аэрируется в течение определенного периода времени; когда второй этаж заполнен, аэрация первого слоя прекращается, и начинается аэрация второго слоя. Фильтрат непрерывно рециркулируется. Этот процесс продолжается до тех пор, пока полигон не будет заполнен. Предполагается, что та-

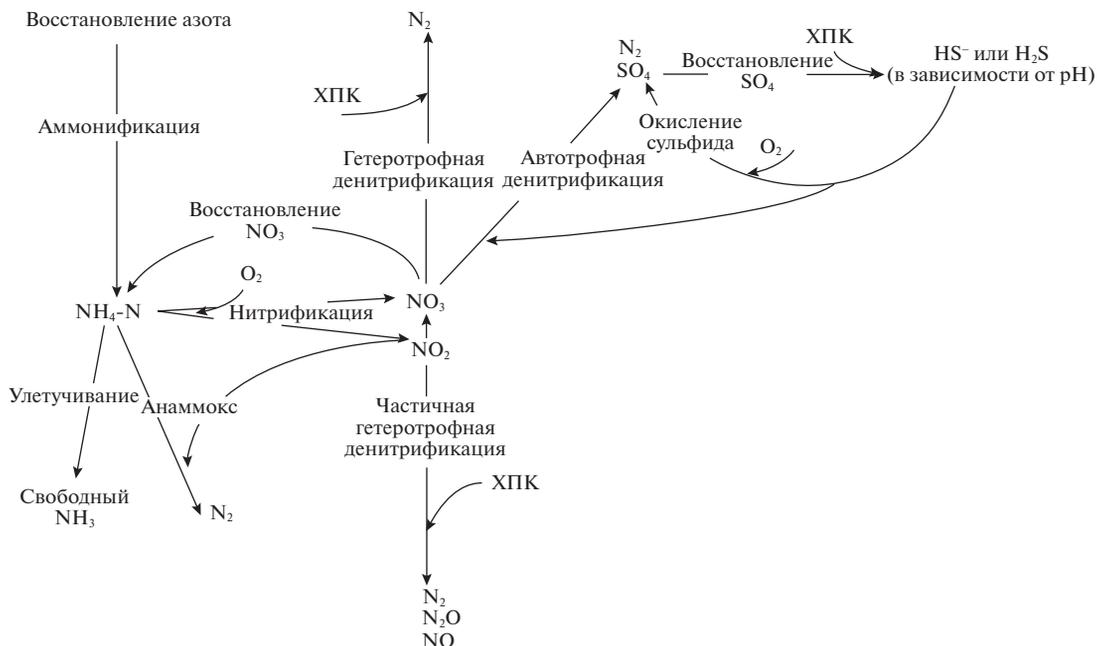


Рис. 3. Потенциальные пути трансформации и/или удаления азота в свалках-биореакторах [3].

кая система ускоряет типичные процессы анаэробной деградации, в частности, начало метаногенеза.

Факультативные свалки-биореакторы эксплуатируются с целью активного разложения массы отходов и в то же время для управления высокими концентрациями аммония, обычно присутствующими в фильтрате со свалок-биореакторов. В факультативных системах фильтрат удаляется из свалки-биореактора и нитрифицируется во внешней системе обработки перед рециркуляцией [3]. Таким образом, концентрации аммонийного азота в обработанном фильтрате низки или отсутствуют, тогда как уровни нитрата высоки. По мере того, как богатый нитратом фильтрат рециркулируется и проходит через тело полигона, происходит денитрификация, где несколько видов микроорганизмов, включая факультативные микроорганизмы, используют нитрат для дыхания. Хотя этот тип биореактора во многих исследованиях не оценивался, имеются лабораторные данные, свидетельствующие о том, что внедрение такой системы является оправданным [3, 23].

Таким образом, эксплуатация полигона как биореактора предоставляет дополнительные возможности для процессов трансформации и удаления азота *in situ*. При добавлении воздуха в тело полигона такие биологические процессы, как нитрификация, которые традиционно обнаруживаются и ожидаются только в грунтовых покрытиях полигонов в результате диффузии воздуха, теперь могут происходить внутри массы отходов. Кроме того, рециркуляция нитрифицированного

фильтрата позволяет проводить процессы денитрификации в бескислородных зонах, обнаруженных как в анаэробных, так и в аэробных свалках-биореакторах. На рис. 3 показаны возможные пути трансформации и/или удаления азота, которые могут происходить в свалках-биореакторах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительность загрязнения фильтрата аммонийным азотом является одной из наиболее острых проблем на свалках и полигонах ТКО, и вполне вероятно, что именно его присутствие определит, когда свалка станет биологически стабильной и можно будет закончить мониторинг после закрытия полигона [23]. Продолжительность выделения NH_4^+ из отходов в значительной степени определяется их составом, содержанием органического вещества, технологией захоронения. В связи с этим существуют различные мнения о времени снижения концентраций NH_4^+ до значений, безопасных для природной среды. Однако все исследователи подчеркивают весьма значительную продолжительность загрязнения фильтрата аммонийным азотом.

Традиционно полигоны считались системами хранения и локализации, функционирующими в основном для депонирования отходов. Однако в последнее время подход к управлению ТКО изменился в связи с внедрением новой технологии захоронения отходов – метода биореактора. Конструкция системы свалки-биореактора обеспечивает гибкость в расположении и продолительно-

сти нагнетания жидкости и воздуха, позволяя регулировать рН, окислительно-восстановительный потенциал и содержание влаги для создания среды, способствующей микробиальной деградации и биологическому удалению аммония. По сравнению с обычными полигонами свалки-биореакторы показали более быстрый и полный процесс конверсии и стабилизации отходов [3], в связи с чем существует вероятность значительного сокращения длительности загрязнения фильтра аммонийным азотом и минимизации загрязнения компонентов природной среды на участках размещения полигонов ТКО.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № 2.р. АААА-А19-119101890052-5 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00574.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Assmuth, T.W., Strandberg T. Ground-water contamination at Finnish landfills, *Water, Air & Soil Pollution*. 1993. V. 69. № 1–2. P. 179–199.
2. Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Kjeldsen, P., Gabr, M.A., Borden, R.C. Critical evaluation of factors required to terminate the postclosure monitoring period at solid waste landfills, *Environmental Science & Technology*. 2002. V. 36. № 16. P. 3457–3464.
3. Berge, N.D., Reinhart, D.R., Townsend, T.G. The fate of nitrogen in bioreactor landfills, *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*. 2005. V. 35. № 4. P. 365–399.
4. Berge, N.D., Reinhart, D.R., Dietz, J., Townsend, T. In situ ammonia removal in bioreactor landfill leachate, *Waste Management*. 2006. V. 26. № 4. P. 334–343.
5. Bjerg, P.L., Rügge, K., Pedersen, J.K., Christensen, T.H. Distribution of redox-sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark), *Environmental Science & Technology*. 1995. V. 29. P. 1387–1394.
6. Brady, N.C., Weil, R.R. *The Nature and Properties of Soils*: 13th edition, NJ, USA: Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 2002, 960 p., ISBN: 978-0130167637.
7. Buss, S.R., Herbert, A.W., Morgan, P., Thornton, S.F., Smith, J.W.N. A review of ammonium attenuation in soil and groundwater, *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2004. V. 37. № 4. P. 347–359.
8. Christensen, T.H., Bjerg, P.L., Kjeldsen, P. Natural attenuation: a feasible approach to remediation of groundwater pollution at landfills? *Ground Water Monitoring & Remediation*. 2000. V. 20. № 1. P. 69–77.
9. Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Bjerg, P.L., Jensen, D.L., et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes, *Applied Geochemistry*. 2001. V. 16. № 7–8. P. 659–718.
10. Cozzarelli, I.M., Böhlke, J.K., Masone, R.J., Breit, G.N., et al. Biogeochemical evolution of a landfill leachate plume, Norman, Oklahoma, *Ground Water*. 2011. V. 49. № 5. P. 663–687.
11. DeSimone, L.A., Barlow, P.M., Howes, B.L. A Nitrogen-rich Septage-effluent Plume in a Glacial Aquifer, Cape Cod, Massachusetts, February 1990 through December 1992, 1996, 96 p., (US Geological Survey Water Supply Paper; 2456). <https://pubs.usgs.gov/wsp/2456/report.pdf>.
12. Ehrig, H.-J. Water and element balances of Landfills // *The Landfill* / Baccini P., ed., Berlin, Germany: Springer Verlag. 1989. P. 83–115, (Lecture Notes in Earth Sciences. V. 20).
13. Erskine, A.D. Transport of ammonium in aquifers: retardation and degradation, *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. 2000. V. 33. № 2. P. 161–170.
14. Galitskaya, I.V., Putilina, V.S., Yuganova, T.I. *Prodolzhitel'nost' vy'shelachivaniya metallov iz svalochnogo tela pri zaxoronenii tverdyx kommunal'nyx otxodov* [Duration of leaching of heavy metals from the landfill body at the municipal solid waste disposal] *Geoekologiya*. 2020. № 6. P. 3–13. (in Russian)
15. Horan, N.J. *Biological Wastewater Treatment Systems, Theory and Operation*. Chichester, England, NY, USA: John Wiley & Sons. 1990, 310 p., ISBN: 0471922587, 0471924253.
16. Hydrogeological Risk Assessments for Landfills and the Derivation of Groundwater Control and Trigger Levels: Landfill Directive Project LFTGN01, Bristol, UK: Environment Agency. 2003. http://adlib.everysite.co.uk/resources/000/064/494/Hydrogeological_Risk.pdf.
17. Jiang, J.G., Yang, G.D., Deng, Z., Huang, Y.F., Huang, Z.L. et al. Pilot-scale experiment on anaerobic bioreactor landfills in China, *Waste Management*. 2007. V. 27. № 7. P. 893–901.
18. Kjeldsen, P., Christophersen, M. Composition of leachate from old landfills in Denmark, *Waste Management & Research*. 2001. V. 19. № 3. P. 249–256.
19. Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review, *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*. 2002. V. 32. № 4. P. 297–336.
20. Kruempelbeck, I., Ehrig, H.-J. Long-term behavior of municipal solid waste landfills in Germany, *Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, 48 October, S. Margherita di Pula, Cagliari*, Proceedings V. I / Christensen T. H., Cossu R., Stegmann R., eds., CISA - Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy 1999. P. 27–36. (from [19])
21. Long, Y., Guo, Q.-W., Fang, C.-R., Zhu, Y.-M., Shen, D.-S. In situ nitrogen removal in phase-separate bioreactor landfill, *Bioresource Technology*. 2008. V. 99. № 13. P. 5352–5361.
22. Pichler, M., Kogner-Knabner, I. Chemolytic analysis of organic matter during aerobic and anaerobic treatment of municipal solid waste, *Journal of Environmental Quality*. 2000. V. 29. № 4. P. 1337–1344.
23. Price, G.A., Barlaz, M.A., Hater, G.R. Nitrogen management in bioreactor landfills, *Waste Management*. 2003. V. 23. № 7. P. 675–688.
24. Read, A.D., Hudgins, M., Philips, P. Perpetual landfilling through aeration of the waste mass; lessons from test cells in Georgia (USA), *Waste Management*. 2001. V. 21. № 7. P. 617–629.

25. Reinhart, D.R., Al-Yousfi, A.B. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics, *Waste Management & Research*. 1996. V. 14. № 4. P. 337–346.
26. Reinhart, D.R., McCreanor, P.T., Townsend, T.G. The bioreactor: its status and future, *Waste Management & Research*. 2002. V. 20. № 2. P. 172–186.
27. Ritzkowski, M., Heyer, K.-U., Stegmann, R. Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills, *Waste Management*. 2006. V. 26. № 4. P. 356–372.
28. Robinson, H.D. The Technical Aspects of Controlled Waste Management. A Review of the Composition of Leachates from Domestic Wastes in Landfill Sites: Report for the UK Department of the Environment. Waste Science and Research / Aspinwall & Company, Ltd, London, UK. 1995.
29. Sliusar, N., Vaisman, Y., Korotaev, V. Ocenka dolgosrochnyx emissij ob'ektov zahoroneniya tverdyx kommunal'nyx otxodov: rezul'taty polevyx issledovanij i laboratornogo modelirovaniya [The estimation of long-term emissions from municipal solid waste landfill-sites: the results of field studies and Laboratory Modeling]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2016. V. 20. № 4. P. 32–39. (in Russian)
30. Thamdrup, B., Dalsgaard, T. Production of N₂ through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments, *Applied & Environmental Microbiology*. 2002. V. 68. № 3. P. 1312–1318.
31. Townsend, T.G., Miller, W., Lee, H., Earle, J. Acceleration of landfill stabilization using leachate recycle, *Journal of Environmental Engineering*. 1996. V. 122. № 4. P. 263–268.
32. Vodyanitskii, Yu.N. Biochemical processes in soil and groundwater contaminated by leachates from municipal landfills (Mini review), *Annals of Agrarian Science*. 2016. V. 14. № 3. P. 249–256.
33. Wang, Q., Matsufuji, Y., Dong, L., Huang, Q.F. et al. Research on leachate recirculation from different types of landfills, *Waste Management*. 2006. V. 26. № 8. P. 815–824.
34. Zavizion, Yu.V., Slyusar, N.N., Glushankova, I.S., Zagorskaya, Yu.M. Ocenka fiziko-ximicheskix parametrov otxodov raznogo sroka zaxoroneniya [Evaluation of physicochemical parameters of wastes with different disposal periods] *Vestnik PNIPU. Prikladnaya e'kologiya. Urbanistika*. 2015. № 3 (19). P. 82–96. (in Russian)
35. Zhao, R.Z., Novak, J.T., Goldsmith, C.D. Evaluation of on-site biological treatment for landfill leachates and its impact: a size distribution study, *Water Research*. 2012. V. 46. № 12. P. 3837–3848.
36. Zhao, R., Gupta, A., Novak, J.T., Goldsmith, C.D. Evolution of nitrogen species in landfill leachates under various stabilization states, *Waste Management*. 2017. V. 69. P. 225–231.
37. Zhao, Y., Song, L., Huang, R., Song, L., Li, X. Recycling of aged refuse from a closed landfill, *Waste Management & Research*. 2007. V. 25. № 2. P. 130–138.

AMMONIUM NITROGEN IN THE LEACHATE OF MSW LANDFILLS: FORMATION, TRANSFORMATION, AND LONG-TERM POLLUTION

I. V. Galitskaya^{a,*}, V. S. Putilina^{a,##}, and T. I. Yuganova^{a,###}

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

^{*} *E-mail: galgeoenv@mail.ru*

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

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

The paper deals with the study of issues related to the duration of ammonium nitrogen release from the municipal solid waste to the landfill filtrate, the forms of nitrogen in the filtrate, the processes of ammonium ion sorption and transformation in the landfill body, carried out on the basis of analysis of Russian and foreign publications. The mechanisms of reversible and irreversible sorption of ammonium ion have been considered, and the values of its distribution coefficients for various rocks are given. The processes of ammonium ion transformation under aerobic and anaerobic conditions are analyzed, including the recently established process of anaerobic microbial reaction of NH₄⁺ nitrite oxidation, called “anammox”, which plays an important role in the biological nitrogen cycle. The processes of formation and transformation of NH₄⁺ in the landfills are clearly traced on the example of waste disposal in aerobic and anaerobic landfills bioreactors.

Keywords: *MSW landfill, leachate, ammonium, nitrate, nitrite, groundwater pollution, landfill-bioreactor, long-term emissions*

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.340 (571.1)

ОЦЕНКА УЩЕРБА ЖИЛЫМ И ПРОМЫШЛЕННЫМ ЗДАНИЯМ И СООРУЖЕНИЯМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУР И ОТТАИВАНИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА

© 2021 г. В. П. Мельников^{1,2,*}, В. И. Осипов^{3,**}, А. В. Брушков^{4,***}, С. В. Бадина^{5,6,****},
Д. С. Дроздов¹, В. А. Дубровин^{7,*****}, М. Н. Железняк^{8,*****}, М. Р. Садуртдинов¹,
Д. О. Сергеев^{3,*****}, Н. А. Остарков^{9,*****}, А. А. Фалалеева⁴, Я. Ю. Шелков⁴

¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, ул. Малыгина, д. 86, Тюмень, 625026 Россия

² АНО “Губернская академия”, ул. Малыгина, д. 86, Тюмень, 625026 Россия

³ Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

⁴ МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991 Россия

⁵ Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Нахимовский пр., д. 47, Москва, 117418 Россия

⁶ ФГБОУ ВО “РЭУ им. Г.В. Плеханова”, Стремянный пер., д. 36, Москва, 117997 Россия

⁷ ФГБУ “Гидроспецгеология”, ул. Маршала Рыбалко, д. 4, Москва, 123060 Россия

⁸ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, Якутск, 677010 Россия

⁹ ФАНУ “Востокгосплан”, ул. Льва Толстого, д. 8, Хабаровск, 680000 Россия

*E-mail: sciensec@ikz.ru

**E-mail: osipov@geoenv.ru

***E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

****E-mail: bad412@yandex.ru,

*****E-mail: info@specgeo.ru

*****E-mail: fe@mpi.ysn.ru,

*****E-mail: sergueevdo@mail.ru,

*****E-mail: n.ostarkov@vostokgosplan.ru

Поступила в редакцию 16.11.2020 г.

После доработки 25.11.2020 г.

Принята к публикации 26.11.2020 г.

В настоящей работе предпринята попытка оценки возможного ущерба от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений для различных сценариев потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ, расположенных в криолитозоне. Предполагаемое изменение среднегодовых температур грунтов в выделенных муниципальных образованиях АЗРФ взято из прогнозных данных Климатического центра Росгидромета и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, по трендам изменения температур воздуха и грунтов и фактическим данным по изменениям температур в основаниях зданий. Затем проводились расчеты для возможных вариантов изменения температур грунтов. Среднегодовая температура грунтов (СГТГ) отличается от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) на величину общей сдвижки, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, температурной сдвижки и влияния атмосферных осадков. Общая сдвижка оценивалась двумя способами – расчетным, с учетом возможных изменений параметров в связи с изменением климата, и по данным об общей сдвижке, наблюдаемой в районах АЗРФ. Возможные сценарии учитывались как отдельные варианты, и определялся максимальный и минимальный ущерб при различных (крайних) значениях характеристик грунтов. Принималось, что основная часть зданий и сооружений построена с сохранением мерзлого основания грунтов, а в качестве фундамента выбирались наиболее распространенныеисячие сваи. Оценивалось изменение их несущей способности, беря в расчет развитие деформаций в случае, если это изменение превышало запас прочности по СП 25.13330.2012. Авторы предлагают свой вариант методического подхода к прогнозированию ущерба в криолитозоне. Наибольшие ущербы в контексте прогнозируемых изменений связаны с жилищным фондом и зданиями и сооружениями отраслей экономики. В целях оценки стоимости жилфонда была создана база данных муниципальных образований регионов АЗРФ, включающая адрес жилого дома, год ввода в эксплуатацию, площадь. Всего в базу данных вошли 23.9 тыс. жилых домов общей площадью порядка 44.6 млн м². Для оценки стоимости зда-

ний и сооружений принималось допущение, что показатель стоимости основных фондов пропорционален объему валового производства по соответствующему виду экономической деятельности, а объем валового производства в свою очередь пропорционален фонду заработной платы с поправкой на среднеотраслевые коэффициенты, полученные для регионов России. Можно предполагать ущерб для зданий и инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 5–7 трлн руб., что в целом согласуется с другими оценками. Ущерб жилому фонду ожидается на порядок меньше, около 700 млрд руб.

Ключевые слова: оценка ущерба, Арктическая зона Российской Федерации, многолетнемерзлые породы, изменения температуры, оттаивание, жилые и промышленные здания, несущая способность мерзлых грунтов

DOI: 10.31857/S0869780921010070

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, криолитозона покрывает около 24% суши в северном полушарии и содержит почти половину всего органического углерода (вероятно, около 1700 млрд т) от его общего количества в почве планеты, и в 4 раза больше, чем уже было выброшено людьми после промышленной революции [12]. Даже если часть парниковых газов, сохраняющихся в многолетнемерзлых породах (ММП) и способных образоваться при их оттаивании, попадет в атмосферу, это будет иметь серьезные последствия для всей климатической системы Земли. Температура верхних горизонтов ММП повышается гораздо быстрее, чем температура воздуха в Арктике, и за последние 30 лет выросла примерно на 1.5–2.5°C. В результате потепления к концу XXI в. может произойти протаивание от 30% до 85% верхних горизонтов криолитозоны с разрушением инфраструктуры и необратимыми изменениями ландшафтов. Оттаивание ММП может привести к появлению вредных микроорганизмов, как это случилось в 2016 г., когда вспышка сибирской язвы стала причиной госпитализации более 70 человек на Ямале, гибели ребенка и более 2300 северных оленей.

Климатические изменения являются причиной экономического ущерба [8, 11, 12, 17]. Было показано [9], что в XXI в. ущерб от дополнительного потепления, вызванного уменьшением альбедо из-за потери морского льда и снега, а также эмиссии метана, добавится к ежегодному ущербу от потепления, который оценивается от 7.5 трлн до 91.3 трлн US \$ ежегодно. Согласно [17], оттаивание ММП добавит около 70 трлн US \$ к общему ущербу, если планета нагреется на 3°C к 2100 г. Даже если потепление составит только около 1.5°C, дополнительно будет потеряно в целом 24.8 трлн US \$. По другим оценкам, оттаивание мерзлоты в Арктике будет стоить обществу 43 трлн US \$ до конца столетия [11]. Считается, что проблемы оттаивания ММП коснутся около 4 млн человек в мире и примерно 70% существующей инфраструктуры. При этом треть инфраструктуры и около 45% месторождений углеводородов пострадают в Российской Арктике [10].

Было показано [13], что только для Аляски потепление обойдется примерно в 1.6–2.1 млрд US \$ ущерба до 2099 г. Одним из примеров является международный аэропорт в Гренландии, где около 300 м взлетной полосы недавно пострадали в результате осадки при оттаивании, а стоимость ремонта составит 270 млн €, по данным строительной компании KJ Greenland. РБК сообщало, что Росприроднадзор оценил сумму экологического ущерба от разлива топлива летом 2020 г. на ТЭЦ-3 “Норникеля” почти в 148 млрд руб.

Действительно, в первую очередь нарушится устойчивость зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. Экономический ущерб в Российской Арктике к настоящему времени оценен в работе [16] и касается всей области криолитозоны России: он составит от 50 до 150 млрд руб. (2.3 млрд US \$) в год. При этом был выбран наихудший (максимальный) сценарий климатического потепления. В работе говорится, что авторы оценивали изменение несущей способности грунтов. В качестве методологической базы оценки таких явлений использовались результаты, полученные ранее и основанные на авторских геотехнических моделях изменений ММП [15]. Кроме того, в работе [5] рассматриваются 3 сценария изменения устойчивости дорожной инфраструктуры под влиянием протаивания в девяти регионах Российской Арктики. Показано, что при инерционном (консервативном) сценарии развития дорожной инфраструктуры в 2020–2050 гг. капитальные затраты на поддержание ее устойчивости и снижение рисков разрушения под влиянием протаивания и деградации ММП составят в среднем не менее 14 млрд руб. в год, при умеренном и модернизационном сценариях превысят 21 и 28 млрд руб. соответственно. Максимальные показатели будут характерны для Республики Саха (Якутия), Магаданской обл. и Чукотского АО.

Цель настоящей работы — попытка оценить возможный ущерб от потери несущей способности фундаментов зданий и сооружений при различных сценариях потепления в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) к 2050 г.

2. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЩЕРБА

Методика оценки ущерба состояла из нескольких стадий: 1) оценивались возможные сценарии изменения температур воздуха в выделенных районах; 2) оценивались возможные изменения температур мерзлых грунтов; 3) оценивалось изменение несущей способности грунтов; 4) выполнялась оценка ущерба. Оценка проводилась отдельно для 39 муниципальных образований (МО) АЗРФ¹, расположенных в районах развития ММП.

2.1. Оценка температур воздуха в выделенных районах

Оценка возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных муниципальных образованиях (МО) АЗРФ выполнялась на основе прогнозных данных Климатического центра Росгидромета “Изменение климата России в 21-м веке” [3] и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 [12]. При этом учитывался диапазон изменений среднегодовых температур воздуха по различным сценариям (табл. 1). В дальнейшем все три сценария учитывались как отдельные варианты, и по ним определяли максимальный и минимальный ущерб.

2.2. Оценка возможных температур мерзлых грунтов

Среднегодовая температура грунтов (СГТГ) отличается от среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) на величину общей сдвижки, которая складывается из влияния радиационной поправки, снега, растительности, водного покрова, температурной сдвижки и влияния атмосферных осадков. Общая сдвижка оценивалась двумя способами – расчетным, с учетом возможных изменений параметров в связи с изменением климата, и по данным об общей сдвижке, наблюдаемой в районах АЗРФ [2]. Оба значения сравнивались и в дальнейшем учитывались в оценке ущерба как различные варианты. Расчет выполнялся в соответствии с методикой, изложенной в [4]. При этом по грунтовым условиям и характеристикам грунтов, а также характеристикам покровов и других факторов, влияющих на температурный режим, выбирался реалистичный диапазон их изменения, и расчеты выполнялись для крайних значений выбранных диапазонов характеристик (табл. 2).

При этом предполагалось, что на строительных площадках и непосредственно под зданиями снежный и растительный покровы отсутствуют, что является типичным случаем для большинства

зданий. Разница температур грунтов в естественных условиях и на застроенной (нарушенной) территории, а также разница между температурами воздуха и температурами грунтов на застроенной (нарушенной) территории назначалась в основном по [2].

2.3. Оценка изменения несущей способности грунтов

Для оценки изменения несущей способности грунтов принимается, что основная часть зданий и сооружений в АЗРФ построена по I принципу строительства с сохранением мерзлого основания грунтов. В качестве фундамента выбираются висячие сваи как наиболее распространенный вариант. Сначала оценивается их несущая способность в настоящий момент, которая, как предполагается, должна соответствовать несущей способности, определенной в проекте. Затем проводятся расчеты для всех возможных вариантов изменения температур грунтов.

При этом учитывались заложенные в СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” [6] допущения возможности повышения температур основания для песчаных и крупнообломочных грунтов на 0.5°C, а для глинистых на 1.0°C без ущерба для несущей способности оснований. Таким образом, из прогнозного повышения температуры вычиталось 0.5°C для песчаных грунтов и 1.0°C для глинистых грунтов там, где значение изменения температуры превышало 1.0°C.

Величины несущей способности в настоящее время и к середине столетия в соответствии с прогнозом повышения температуры основания сравнивались, и, если сокращение несущей способности в результате потепления грунтов основания составляло 15%, фундамент здания считался потерявшим несущую способность в соответствии с п. 7.2.1 СП 25.13330.2012 и п. 5.7.2 СП 22.13330.2016 “Основания зданий и сооружений”². Эти разделы определяют коэффициент надежности по ответственности, принимаемый равным 1.2, 1.15 и 1.10, соответственно, для сооружений геотехнических категорий 3, 2 и 1. Большинство зданий относится к категории 2, поэтому для оценки устойчивости выбрано значение уменьшения несущей способности на 15%.

Методика расчета несущей способности по СП 25.13330.2012, в соответствии с правилами, заключается в следующем. Прежде всего, определяются расчетные характеристики механических свойств грунтов (длительной прочности). Расчет оснований фундаментов по первой группе предельных состояний (по несущей способно-

¹ АЗРФ рассмотрена в границах, установленных Указом Президента Российской Федерации от 02.05.2014 г. № 296 “О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации” с последующими редакциями.

² URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054206>

Таблица 1. Изменения среднегодовых температур воздуха на середину XXI в. по различным сценариям для некоторых муниципальных образований АЗРФ (пример для 7 МО)

Муниципальные образования (МО)	Название метеостанции	Среднегодовая температура воздуха в настоящее время и в соответствии со сценариями потепления к 2050 г., $t_{в.ср.}$, °С
Абыйский муниципальный район	Усть-Мома	-13.2
	RCP 2.6	-10.8
	RCP 4.5	-10.1
	RCP 8.5	-9.3
Анабарский национальный (долгановский) муниципальный район	Саскылах	-14.1
	RCP 2.6	-11.7
	RCP 4.5	-11.0
	RCP 8.5	-10.2
Анадырский муниципальный район	Марково	-7.9
	RCP 2.6	-5.0
	RCP 4.5	-4.5
	RCP 8.5	-3.5
Билибинский муниципальный район	Илирней	-12.7
	RCP 2.6	-9.8
	RCP 4.5	-9.3
	RCP 8.5	-8.3
Верхнеколымский муниципальный район	Зырянка	-10.5
	RCP 2.6	-8.1
	RCP 4.5	-7.4
	RCP 8.5	-6.6
Верхоянский муниципальный район	Верхоянск	-14.5
	RCP 2.6	-12.1
	RCP 4.5	-11.4
	RCP 8.5	-10.6
Городской округ Воркута	Воркута	-5.4
	RCP 2.6	-2.5
	RCP 4.5	-1.9
	RCP 8.5	-1.0

Таблица 2. Диапазон теплофизических характеристик грунтов, принятый в расчетах

Теплота таяния (замерзания) грунта, L_v , Дж/м ³		Объемная теплоемкость грунта, Дж/(м ³ °С)				Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м °С)			
		талого		мерзлого		талого		мерзлого	
min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
$8.368 \cdot 10^7$	$1.464 \cdot 10^8$	$2.720 \cdot 10^6$	$3.766 \cdot 10^6$	$2.510 \cdot 10^6$	$3.347 \cdot 10^6$	1.10	1.30	1.20	1.70

сти) производится, исходя из условия (п. 7.2.1 СП 25.13330.2012)

$$F \leq F_u / \gamma_n, \quad (1)$$

где F – расчетная нагрузка на основание; F_u – несущая способность основания, определяемая расчетом (п. 7.2.2 СП 25.13330.2012).

При этом расчетные температуры грунтов T_z (на глубине z) и T_e (средней, эквивалентной температуре по глубине заложения сваи) определяются расчетом теплового взаимодействия сооружения с многолетнемерзлыми грунтами основания в периодически установившемся тепловом

режиме с учетом переменных в годовом периоде условий теплообмена на поверхности, формы и размеров сооружения, глубины заложения и расположения фундаментов в плане, а также теплового режима сооружения и принятых способов и средств сохранения мерзлого состояния грунтов основания. В наших расчетах значения R_{af} (прочность смерзания грунта с материалом сваи) принимались при средней (эквивалентной) температуре грунта T_e в соответствии с п. 7.2.7 СП 25.13330.2012.

При расчетах многолетнемерзлых оснований по несущей способности расчетные температуры грунтов T_z и T_e принимались равными: T_e – максимальной в годовом периоде средней по глубине заложения фундамента z_d температуре многолетнемерзлого грунта в установившемся эксплуатационном режиме (эквивалентная температура грунта) при условии, что на глубине нулевых годовых амплитуд установилась температура СГТГ; T_z – температура многолетнемерзлого грунта на данной глубине z от его верхней поверхности, принимаемой для наших расчетов оценки ущерба равной СГТГ, т.е. считая, что сваи имеют достаточную длину, сравнимую с глубиной нулевых годовых амплитуд, что, как правило, соответствует действительности, особенно для тяжелых и больших зданий или инженерных сооружений.

В наших расчетах мы не учитывали снижение прочности под нижним концом сваи, принимая, что несущая способность свайного фундамента в основном обеспечивается прочностью смерзания. Ввиду того, что под серединой сооружения температуры часто выше, в расчет брались именно значения температур под серединой сооружения, и в этом случае коэффициент α_e по СП 25.13330.2012 оказывается близким к 0.5. Коэффициент k_1 теплового влияния сооружения изменяется в небольшом диапазоне и в среднем, по видимому, может быть принятым равным 0.5. Температура начала замерзания грунта, T_{bf} , в целом, находится в диапазоне от -0.1°C до -0.25°C и незначительно влияет на результаты расчетов, поэтому мы принимали ее равной в среднем -0.15°C .

В первом варианте расчетов мы исходили из следующего. Нормативное значение среднегодовой температуры многолетнемерзлого грунта T_{0n} определяется по данным полевых измерений температуры грунтов на опытных площадках с естественными условиями. Допускается значение T_{0n} принимать равным температуре грунта на глубине 10 м от поверхности. Практически невозможно установить, каким образом в каждом конкретном случае изыскатели и проектировщики определяли расчетную среднегодовую температуру мерзлого грунта. Принимался оптимистичный вариант, что их оценки и расчеты были правильными,

и она близка в настоящее время к фактической. От том, что, вероятнее всего, они ее занижали, свидетельствует значительное количество деформаций зданий и сооружений в АЗРФ. При этом, конечно, будущее рискует быть еще более пессимистичным, чем оценки, которые мы даем в настоящей работе.

При оценке изменений температур в МО АЗРФ нами были также использованы следующие фактические данные: разность среднегодовых температур мерзлых грунтов в естественных условиях и на территории застройки; разность среднегодовых температур воздуха и мерзлых грунтов на территории застройки в прошлом и в настоящее время, а также расчеты среднегодовых температур мерзлых грунтов в соответствии с методикой, изложенной в [4].

При этом наиболее сложной, на наш взгляд, является оценка изменения среднегодовых температур грунтов на территории застройки (нарушенной территории) по сравнению с температурами грунтов в естественных условиях. Так, для Норильского района установлено, что на территории застройки при использовании I принципа строительства (с сохранением мерзлого состояния оснований) такое изменение температур грунтов составляет от -1°C до $+2^\circ\text{C}$ [2], а для Якутска, например, по данным П.И. Мельникова, более характерно изменение температур грунтов на территории застройки около -2°C , т.е. преимущественно понижение температуры. В пос. Надежный в Норильском промышленном районе среднегодовая температура грунтов до застройки изменялась от -3°C до -4°C , а после застройки под одним из зданий она составляла от -3.1°C до -5.1°C , что свидетельствует об эффективности охлаждающей работы подполья, где, вероятно, отсутствовали растительный и снежный покровы. При застройке пос. Новый Город на участке площадки детского сада был удален почвенно-растительный слой, частично удален снежный покров, и температура повысилась на 0.4°C . На другом участке с теми же нарушениями температура, наоборот, понизилась на 0.6°C . Первые наблюдения за температурами грунтов под зданиями с проветриваемыми подпольем в Якутске проводились еще Г.О. Лукиным в 1950–1956 гг., в результате которых было установлено, что наибольшее понижение температуры грунта под зданием происходит в первые 2–3 года после начала эксплуатации и составляет $3–4^\circ\text{C}$ на глубине 6 м и 0.3°C на глубине 18 м [2].

Вне контура зданий температура грунта в населенных пунктах Центральной Якутии, по данным П.А. Соловьева, значительно понижается по сравнению с температурой в естественных условиях. Так, для Якутска для застройки возрастом 200–300 лет такое понижение температур состав-

ляет от 4°C до 6°C, для застройки возрастом 50–100 лет от 2°C до 4°C, и для застройки возрастом 20–30 лет понижение температуры составляет от 1°C до 2°C. При этом для пос. Чурапча понижение температуры на территории застройки составляет 2–3°C, а для пос. Абалах от 1°C до 2°C [2]. Это явление понижения температуры на территории застройки впервые отмечал еще А.Ф. Миддендорф в 1940-х годах XIX в., М.И. Сумгин объяснял его уборкой и уплотнением снега, Н.И. Салтыков – образованием “культурного слоя”, а П.И. Мельников – засолением грунтов. Однако в черте современной застройки роль этих факторов, или, по крайней мере, двух последних, по-видимому, незначительна из-за устройства канализации.

Необходимо учитывать, что среднегодовая температура воздуха в подполье зданий выше, чем снаружи, на 1–3°C в г. Норильске и на 0.2–1°C в г. Якутске [2]. При этом на поверхности грунта под зданиями формируется среднегодовая температура, близкая к среднегодовой температуре воздуха в подполье. Последняя ниже температуры поверхности грунта в естественных условиях на величины поправок на влияние снега, растительности и радиации, составляющих в сумме 6–8°C и более. Поэтому в целом, если не происходит нарушений при строительстве и эксплуатации, наблюдается понижение температур грунтов на застроенной территории. Если подполье обеспечивает надлежащее охлаждение, в Норильске, по данным М.В. Кима, наблюдается понижение температуры по сравнению с естественными условиями от –3°C до –6°C, в Якутске от –1°C до –3°C, а в Игарке от –0.5°C до –1.5°C.

Во втором варианте наших расчетов, когда температура в основании сооружения определялась по СП 25.13330.2012, мы исходили из того, что допускается определять расчетное значение среднегодовой температуры грунтов T_0 по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{t_y} \left[(T_{f,m} - T_{bf}) t_{f,m} + L_v d_{th,n} \left(\frac{d_{th,n}}{2\lambda_f} + R_s \right) \right] + T_{bf}, \quad (2)$$

где t_y – продолжительность года, принимаемая равной $3.15 \cdot 10^7$ с (8760 ч); $T_{f,m}$ и $t_{f,m}$ – соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха в период отрицательных температур, и продолжительность этого периода, принимаемые по СП 131.13330³; $d_{th,n}$ – нормативная глубина сезонного оттаивания, для предварительных расчетов допускается принимать по формулам Г.1 и Г.2 СП 25.13330.2012; L_v – теплота таяния (замерзания) грунта, определяемая по приложению Б; R_s – термическое сопротивление

снежного покрова, которое мы считали незначительным для условий подполья.

В практике проектирования такое назначение среднегодовой температуры фактически, по-видимому, производится довольно часто, поскольку гарантирует защиту от ошибок при определении фактических температур грунтов при изысканиях. Учитывая это, в своей работе мы также приводим такой расчет как один из вариантов оценки изменения температурного режима грунтов при потеплении и, соответственно, ущерба зданиям и сооружениям. Наибольшие и наименьшие изменения температур грунтов, таким образом, будут определяться сочетаниями грунтовых условий и изменениями глубин протаивания вместе с климатическими изменениями. Изменение мощности и плотности снега в связи с изменением климата в этом варианте расчета не учитывалось потому, что, во-первых, в ряде сценариев климата предполагается увеличение зимних осадков, особенно в восточной части АЗРФ, а во-вторых, что важнее, снежный покров в подполье, как правило, не формируется.

Для прогноза изменения температур воздуха в середине XXI столетия использовались данные из “Второго оценочного доклада изменения климата на территории Российской Федерации” (2014) Росгидромета [1]. Они отражают результаты расчетов будущих изменений климата на территории России с помощью ансамбля глобальных климатических моделей, рассматриваемых в 5-й фазе международного проекта сравнения объединенных моделей (CMIP5). По сравнению с моделями предыдущей фазы проекта CMIP3, модели CMIP5 характеризуются в среднем более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в описании климатических процессов. Результаты расчетов климата с этими моделями используются в Пятом оценочном докладе МГЭИК (2013 г.). В этих расчетах приводятся оценки для новых сценариев изменения содержания парниковых газов и аэрозолей в атмосфере RCP4.5 и RCP8.5. Пятый оценочный доклад МГЭИК [12] рассматривает 4 сценария, при которых концентрация парниковых газов к 2100 г. достигнет 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) и 936 ppm (RCP8.5). Для разных сценариев доступно разное количество моделей, однако во всех случаях – достаточное с позиций репрезентативности. Изменения климата (средние за 20 лет значения климатических характеристик) рассматриваются для середины XXI в. (2041–2060 гг.), по отношению к базовому климатическому периоду 1981–2000 гг. В докладе Росгидромета [1] приводятся изменения температуры приземного воздуха, суммарных осадков, разности осадков и испарения, которые использовались нами для оценок. При этом там, к сожалению, не рассматриваются изменения продол-

³ URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546>

жительности холодного и теплого периодов для различных районов, которые необходимы для расчетов температурного режима.

В среднем для России число дней со снегом сокращается на 0.75 дня за 10 лет (Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2018 г., Росгидромет, 2018⁴). По данным World Meteorological Organization (WMO)⁵, к середине XXI в. ожидается почти повсеместное сокращение числа морозных дней в году (т.е. дней с минимальной суточной температурой ниже 0°C) на 20–30 суток. Таким образом, нами было принято уменьшение продолжительности зимнего периода к середине столетия на 20 суток, что, скорее, является минимальной оценкой.

Как сказано выше, оценка ущерба, базирующаяся на учете изменения несущей способности грунтов основания, может основываться на использовании коэффициентов надежности по ответственности сооружений. Если уменьшение несущей способности в результате повышения температур основания будет больше, чем допустимое по коэффициенту надежности по геотехническим категориям ответственности, здание или инженерное сооружение будет считаться вышедшим из строя. Поэтому при оценке ущерба определяющим является оценка изменений механических характеристик грунтов.

В соответствии с СП 25.13330.2012, расчетные давления на мерзлые грунты R и расчетные сопротивления мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхностям смерзания фундаментов R_{af} определяются опытным путем. Однако при отсутствии опытных данных допускается принимать значения R и R_{af} по таблицам В.1–В.11 СП 25.13330.2012. Как свидетельствует практика проектирования, так поступают достаточно часто, больше доверяя таблицам СП 25.13330.2012, чем лабораторным или полевым (проводятся сравнительно редко) испытаниям грунтов, или сравнивая эти значения и выбирая наименее благоприятный вариант. Таблицы были преобразованы в графики, по которым были определены уравнения аппроксимации в диапазоне температур 0°C ÷ –4°C, как наиболее характерном в практике строительства в АЗРФ (рис. 1).

Значения R_{af} в таблицах В.3, В.6, В.9 и В.12 следует умножать на коэффициент γ_{af} , зависящий от вида поверхности смерзания, однако в нашем случае учитывалось, что, так как, сваи в большинстве случаев бетонные, этот коэффициент принимался равным 1.

⁴ URL: <http://global-climate-change.ru/index.php/ru/component/content/article/2189-doklad>

⁵ URL: <http://seakc.meteoinfo.ru/research/34-change-climat21/130-change>

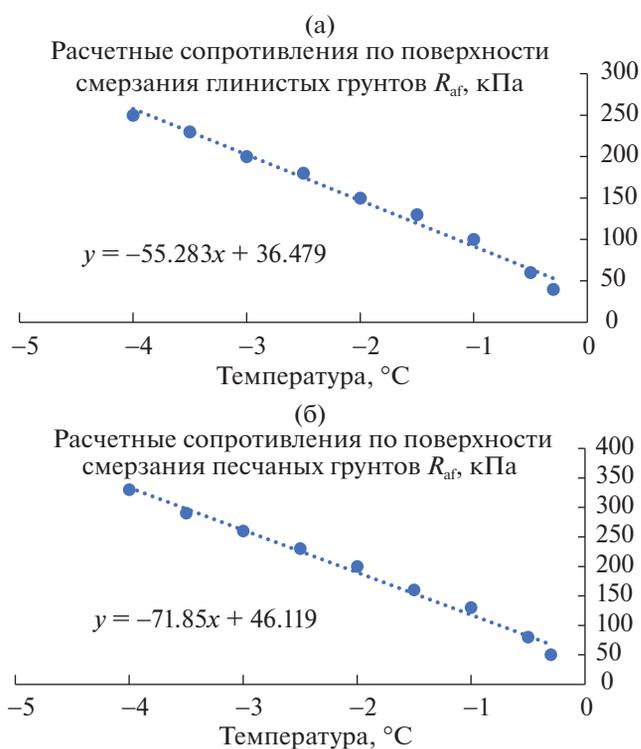


Рис. 1. Расчетные сопротивления сдвигу по поверхности смерзания незасоленного: а – глинистого грунта, б – песчаного грунта, с материалом фундамента по СП 25.13330.2012.

2.4. Методика оценки стоимости жилищного фонда и зданий и сооружений по отраслям экономики в разрезе муниципальных образований АЗРФ

В работе [14] предложен метод количественной оценки расходов на продление (замену) жизненного цикла арктической инфраструктуры. В качестве параметров были выбраны объекты линейной (дороги и трубопроводы) и точечной (здания, аэропорты и порты) инфраструктуры. Существенным упущением представляется не учет зданий и сооружений по основным отраслям экономики (промышленности, сферы услуг и пр.). Авторы утверждают, что в России в ареалы деградации многолетней мерзлоты попадет около 32% инфраструктуры. В работе [7] предложена методика оценки уязвимости социально-экономического потенциала территорий МО АЗРФ к деградации многолетней мерзлоты посредством интегральных индексов. Наряду с ключевым параметром основных фондов также присутствуют валовое производство и население, пространственные параметры. В данной методике, напротив, не учитывается жилой фонд. Эта методика больше подходит для более обширных исследований природного риска, например, прогнозирования ущербов от совокупности природных

опасностей, имеющих площадной характер воздействия (наводнений, опасных склоновых процессов и пр.). Специфика опасных геокриологических процессов в данной методике учитывается недостаточно полно.

В работе [16] в целях оценки будущих ущербов в качестве базовых использованы показатели Росстата по жилой недвижимости, нежилым коммерческим и социальным объектам, линейной инфраструктуре. И вместе с тем – данные о тяжелых машинах и промышленном оборудовании, транспортных средствах и нематериальных активах, т.е. той части основных фондов, которая значительно в меньшей степени уязвима перед деградацией многолетней мерзлоты. Авторы столкнулись с проблемой отсутствия некоторых ключевых статистических показателей на муниципальном уровне. Вводится весьма дискуссионное допущение о том, что пространственная структура основных фондов в регионе соответствует пространственной структуре населения (пропорциональная зависимость). Но данная связь далеко не всегда линейна, особенно для Арктики, где в экономике ключевую роль играет промышленность (соответственно, и в структуре основных фондов значительную долю имеют фонды промышленности), подотрасли которой в современных условиях технологического развития сильно отличаются между собой по показателям трудоемкости и фондоемкости.

В данной статье авторы предлагают свой вариант методического подхода к прогнозированию ущербов в криолитозоне. Наибольшие ущербы в контексте прогнозируемых геокриологических изменений связаны с жилищным фондом и зданиями и сооружениями отраслей экономики⁶. В муниципальном разрезе, масштаб которого принят оптимальным для данного исследования (возможность сопоставления социально-экономических и природных параметров в едином пространственном масштабе), существуют серьезные ограничения в плане обеспеченности показателями стоимости данных видов основных фондов. Для жилфонда информация отсутствует, доступен лишь показатель “Наличие основных фондов на конец года по полной учетной стоимости по коммерческим и некоммерческим организациям (тыс. руб.)”. Под этим видом фондов, следует понимать фонды организаций муниципальной формы собственности, т.е. муниципальный жилищный фонд и объекты городской инфраструктуры, муниципальные социально значимые объекты недвижимости (детские дошкольные учреждения, школы, библиотеки и пр.). По нашим оценкам, эти фонды составляют для рассматриваемых

муниципальных образований в среднем 2–25% от общей суммы, причем их значение наиболее высоко в наименее экономически развитых дотационных районах.

Поскольку этих данных недостаточно для исчерпывающей оценки ущербов на уровне муниципальных образований, необходимо провести дооценку остальной части основных фондов, исходя из значения их суммарной стоимости в соответствующем регионе по видам экономической деятельности. Региональный показатель “Стоимость основных фондов (на конец года; по полной учетной стоимости; миллионов руб.)” включает в себя здания (жилые и нежилые) и сооружения по всем видам экономической деятельности. К сооружениям относятся такие объекты, как, например, магистрали, автомобильные, железные дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов; мосты, эстакады, тоннели; гидротехнические сооружения; магистральные трубопроводы, линии связи и электропередачи; местные трубопроводы, шахты, скважины, сооружения для отдыха, развлечений и проведения досуга и пр. Приватизированное и выкупленное гражданами жилье, не являющееся основными фондами организаций, в данном показателе не отражается⁷. Необходимо иметь в виду, что конструкции оснований фундаментов части таких сооружений не предполагают использование свай, поэтому наша методика оценки потери несущей способности в этом случае имеет ограничения.

В целом, использование этих двух индикаторов (стоимость жилищного фонда и стоимость зданий и сооружений по видам экономической деятельности) позволяет с максимальной подробностью охватить все наиболее уязвимые к геокриологическим изменениям элементы основных фондов.

Информационной базой данного этапа исследования послужили следующие открытые ресурсы:

1. База данных Росстата “Показатели муниципальных образований”; сборники Росстата “Регионы России. Социально-экономические показатели”, “Российский статистический ежегодник 2019”.

2. Официальный сайт Государственной корпорации – Фонд содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства.

3. Нормативно-правовые документы региональных и муниципальных органов власти “Об утверждении размера средней рыночной стоимости одного квадратного метра общей площади жилья”, официальные сайты администраций муниципальных образований.

⁶ Согласно Общероссийскому классификатору основных фондов (ОКОФ), действующему с 01.01.2017 и утвержденному приказом Росстандарта от 12.12.2014 № 2018-ст.

⁷ Подробнее см. Об утверждении Указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения № 11 “Сведения о наличии и движении основных фондов (средств) и других нефинансовых активов”, приказ Минэкономразвития России № 717 от 29 ноября 2019 г.

4. Сайты агентств недвижимости, открытые базы данных недвижимости (<https://www.domofond.ru/>, <http://www.rlt24.com/>, <https://domclick.ru/>, <https://mnogodetey.ru/regions/> и др.).

В целях оценки стоимости жилфонда на основании вышеизложенных информационных ресурсов была создана база данных в территориальном разрезе муниципальных образований регионов АЗРФ, включающая следующие показатели: адрес жилого дома, год ввода в эксплуатацию, площадь. Всего в базу данных вошли 23.9 тыс. жилых домов общей площадью порядка 44.6 млн м².

Для оценки потенциальных ущербов от таяния многолетней мерзлоты требуется рассчитать рыночную стоимость (использование которой при данной задаче представляется предпочтительным, в отличие от, например, кадастровой, ликвидационной и других видов стоимости) жилищного фонда, расположенного в ареалах потенциального риска. Важным уточняющим коэффициентом при этом является дата ввода жилого дома в эксплуатацию, поскольку более новый фонд в целом более приближен к современным эксплуатационным условиям, параметры которых (допустимые предельные значения температур и пр.) закладывались при проектировании, и в целом новый фонд отличается меньшей степенью изношенности (меньше влияние других факторов, влияющих на деформации). В региональной структуре наиболее “молодой” жилищный фонд характерен для регионов нового ресурсного освоения – Ямало-Ненецкого и Ненецкого АО, (а также в арктических районах Якутии за счет того, что старый жилфонд там плохо отображен в статистике).

Данные о площади многоквартирных домов на официальном сайте Фонда содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства приведены по МО с различной степенью полноты: средний процент раскрытия информации от менее чем 60% до 80% и выше. Это потребовало проведения процедуры дооценки недостающих параметров при расчете стоимости. Средняя рыночная стоимость 1 м² общей площади жилья была получена на основании нормативно-правовых документов региональных и муниципальных органов власти “Об утверждении размера средней рыночной стоимости одного квадратного метра общей площади жилья”, с официальных сайтов администраций муниципальных образований, а также при отсутствии данных – посредством анализа сайтов рынка недвижимости. В ряде случаев использовался “Понижающий коэффициент для расчета рыночной стоимости жилья вне областных центров и крупных городов”⁸ для каждого региона.

⁸ Приказ Росстата от 22.08.2012 N 459 “Об утверждении Методологических указаний по расчету текущей рыночной стоимости жилых зданий в соответствии с требованиями Системы национальных счетов”.

Внутрирегиональная дифференциация средней рыночной стоимости 1 м² жилья весьма высока, особенно в регионах, полностью не включенных в состав АЗРФ. В связи с этим, насколько позволяли открытые данные, информация о стоимости бралась в максимально возможном для данного исследования крупном масштабе – на уровне сельских и городских поселений.

Дооценка стоимости жилых домов, для которых отсутствует информация о площади (x) проводилась по формуле (3). По генеральной совокупности данных для каждого муниципального образования была рассчитана доля жилых домов, для которых отсутствует информация о площади. Если эта доля превышала 10% (в данном исследовании выбранный уровень обобщения позволяет считать меньшую долю как не превышающую статистическую погрешность), то недостающий процент оценивался посредством вычисления простой пропорции:

$$x = (K \cdot n) / (100 - n), \quad (3)$$

где K – рассчитанная стоимость жилого фонда в МО, по которому есть данные о площади, млн рублей; n – доля жилых домов в МО, по которым данные о площади отсутствуют, %.

В наименее статистически обеспеченных МО (например, в некоторых арктических районах Якутии) полностью отсутствует информация о площади существующего перечня жилых домов, либо их доля превышает 50%. В таком случае оценка их стоимости проводилась по следующему упрощенному алгоритму: показатель общей площади жилых помещений из базы данных показателей муниципальных образований Росстата перемножался со средней рыночной стоимостью 1 м² жилья в соответствующем муниципалитете.

Для оценки стоимости зданий и сооружений принималось допущение, что показатель стоимости основных фондов пропорционален объему валового производства по соответствующему виду экономической деятельности, а объем валового производства в свою очередь пропорционален фонду заработной платы с поправкой на среднеотраслевые коэффициенты, полученные для регионов России. В разрезе муниципальных образований в открытом доступе также отсутствует статистическая информация по объемам валового производства в стоимостном выражении по многим значимым отраслям экономики. Росстатом даны лишь следующие отрасли, формирующие добавленную стоимость: объем промышленного и сельскохозяйственного производства, оборот розничной торговли (т.е. отрасли, по которым напрямую можно оценить стоимость основных фондов на основании прямой пропорции). Необходима дооценка остальных значимых видов экономической деятельности: строитель-

ства, транспорта и связи, операций с недвижимостью, государственного управления, здравоохранения и образования, которую предлагается произвести на основании данных о фонде заработной платы работников организаций по соответствующим отраслям.

Обосновать рациональность такого подхода можно путем подтверждения корреляционных связей данного показателя со статистически доступными параметрами — объемом производства в обрабатывающей промышленности и в производстве и распределении электроэнергии, газа и воды и фондом зарплаты в соответствующих отраслях. Анализ данных по МО регионов, территории которых включены в состав АЗРФ, показал очень высокую степень корреляции этих двух показателей — от 0.7 до 1. При этом, несмотря на очевидную связь двух параметров, соблюдены условия применимости корреляции Пирсона: во-первых, проведена дополнительная проверка с исключением выбросов; во-вторых, проверено наличие нелинейных зависимостей между переменными (анализ диаграмм рассеяния).

Дооценка недостающих параметров произведена следующим образом: региональный показатель оборота организаций⁹ по каждому виду экономической деятельности распределяется по МО пропорционально фонду заработной платы по соответствующей отрасли. Путем суммирования предоставленных Росстатом и рассчитанных показателей получено оценочное значение валового производства для каждого МО рассматриваемых регионов.

Фонды по видам экономической деятельности (согласно ОКВЭД) рассчитаны для каждого МО следующим образом: стоимость фондов по региону распределена пропорционально доле каждого МО в валовом производстве соответствующей отрасли. Основные фонды из категории “Прочие виды” были распределены для каждого МО пропорционально суммарному валовому производству по всем отраслям. Такая оценка достаточно грубая, однако была проведена следующая процедура верификации: Росстатом даются значения стоимости основных фондов по некоторым крупнейшим городам. Таким образом, расчетные значения можно сравнить с фактическими. Например, расчеты по городам регионов, имеющих арктические территории, дали следующие результаты: г. Мурманск — 94% (доля расчетного значения от фактического); г. Красноярск — 101%; г. Петрозаводск — 85%; г. Якутск — 114% и пр.). В связи с

⁹ Оборот организаций — стоимость отгруженных товаров собственного производства, выполненных собственными силами работ и услуг, а также выручка от продажи приобретенных на стороне товаров (без налога на добавленную стоимость, акцизов и других аналогичных обязательных платежей).

этим можно утверждать, что расчетные значения близки к фактическим, и, главное, в целом учтены внутрирегиональные пропорции и дифференциация. Далее, для повышения точности расчетов и снижения погрешности, из общерегионального значения стоимости основных фондов было вычтено значение, данное Росстатом для городов, и уже получившийся остаток распределяется по оставшимся МО. Обычно доля регионального центра и крупнейших городов в основных фондах весьма велика. Например, для регионов АЗРФ доля столиц по этому показателю составляет: Анадырь — 49%, Мурманск — 22%, Красноярск — 25%, Архангельск — 21% и т.д., что существенно снижает погрешность произведенных дооценок.

Важно понимать какую часть в общей стоимости основных фондов составляют здания и сооружения, как наиболее восприимчивая составляющая к деградации ММП. В общей структуре основных фондов (среднероссийское значение) доля зданий и сооружений — 64% (остальное приходится на машины и оборудование, транспортные средства и пр. виды), т.е. среднеотраслевой понижающий коэффициент равен 0.64.

Таким образом выявлены следующие понижающие коэффициенты, на которые были перемножены получившиеся на предыдущем этапе оценки стоимости основных фондов по соответствующим видам экономической деятельности каждого из рассматриваемых МО: сельское хозяйство — 0.46; добыча топливно-энергетических полезных ископаемых — 77.6; добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических — 0.51; рыболовство — 0.1; обрабатывающие производства — 0.42; производство и распределение электроэнергии, газа и воды — 0.61; транспорт и связь — 0.61; туризм — 0.31. Результаты расчета двух ключевых параметров (жилищного фонда и зданий и сооружений по отраслям экономики) представлены в табл. 3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОГО УЩЕРБА ЖИЛИЩНОМУ ФОНДУ, ЗДАНИЯМ И СООРУЖЕНИЯМ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ

Если изменение несущей способности фундамента для выделенного района (муниципального образования) находилось в пределах 15%, ущерб, как отмечалось выше (п. 2.3), считался нулевым. Если же несущая способность фундамента изменялась на 15%, здания и инженерные сооружения считались аварийными, и их стоимость относилась на счет ущерба. Данные о стоимости зданий и инженерных сооружений были получены на основании оценки основных фондов соответствующих районов АЗРФ (см. табл. 3).

Таблица 3. Стоимость зданий и инженерных сооружений в муниципальных образованиях АЗРФ

Муниципальные образования (МО)	Стоимость жилфонда, млн руб.	Стоимость зданий и сооружений по всем видам экономической деятельности, млн руб.
<i>Муниципальный район</i>		
Абыйский	4080	4416.4
Аллаиховский	2851.2	2851.0
Анабарский национальный (Долгано-эвенкийский)	4224.7	14460.4
Анадырский	17404.8	6819.2
Билибинский	18808.3	14684.7
Булунский	3699.0	9573.2
Верхнеколымский	2504.9	9047.4
Верхоянский	3186.8	9047.4
Жиганский	2419.0	2477.5
Заполярный	12866.6	380872.5
Красноселькупский	4184.2	188334.9
Момский	1550.9	1032.0
Надымский	52923.8	1544143.7
Нижнеколымский	1235.9	3426.3
Новая Земля	2076	699.0
Оленекский	5752.7	1275.2
Приуральский	10708.3	23576.7
Пуровский	69709.4	2515727.5
Среднеколымский	1493.4	1814.1
Тазовский	18687.1	685140.8
Таймырский Долгано-Ненецкий	13591.9	63918.6
Туруханский	5899.2	345690.4
Усть-Янский	6342.7	5520.0
Чукотский	4805.3	1541.8
Шурышкарский	8663.1	6770.8
Эвено-Бытантайский национальный	89.3	589.5
Ямальский	11136.67	869169.9
<i>Городской округ</i>		
Воркута	3854.3	273896.4
Анадырь	39153.8	77549.5
Певек	15186.7	11522.3
Провиденский	5630.6	1312.8
Этвекино	10036.82	3979.1
Губкинский	37962.4	68797.2
Лабытнанги	36305.8	126740.4
Муравленко	25644.8	48665.1
Нарьян-Мар	42635.4	177882.6
Новый Уренгой	250203.3	735718.1
Норильск	116646.9	597982.9
Ноябрьск	160857.2	533565.1
Салехард	95403.8	244629.9

Таблица 4. Оценки линейного тренда регионально осредненной температуры приземного воздуха за 1976–2006 гг. и 1976–2012 гг. для физико-географических регионов России и федеральных округов, в среднем за год и по сезонам [1]: b – коэффициент линейного тренда ($^{\circ}\text{C}/10$ лет), α_0 – критический уровень значимости

Регион	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	b	α_0	b	α_0	b	α_0	b	α_0	b	α_0
Физико-географические регионы России, 1976–2006										
Европейская часть РФ	0.48	1	0.68	15	0.28	18	0.45	1	0.45	7
Западная Сибирь	0.32	5	0.26	59	0.60	6	0.22	23	0.18	59
Средняя Сибирь	0.46	2	0.42	45	0.58	5	0.47	0	0.24	45
Прибайкалье и Забайкалье	0.46	0	0.39	35	0.66	1	0.58	0	0.21	45
Приамурье и Приморье	0.40	0	0.52	10	0.32	12	0.26	3	0.56	0
Восточная Сибирь	0.42	1	–0.23	35	0.73	1	0.44	0	0.85	0
Физико-географические регионы России, 1976–2012										
Европейская часть РФ	0.52	0	0.43	18	0.41	1	0.59	0	0.64	0
Западная Сибирь	0.29	4	–0.09	100	0.68	0	0.19	18	0.45	7
Средняя Сибирь	0.43	0	0.25	56	0.66	0	0.43	0	0.39	14
Прибайкалье и Забайкалье	0.32	1	0.06	100	0.53	1	0.52	0	0.26	14
Приамурье и Приморье	0.39	0	0.44	6	0.28	9	0.36	0	0.53	0
Восточная Сибирь	0.50	0	–0.04	100	0.74	0	0.46	0	0.80	0
Федеральные округа РФ, 1976–2012										
Северо-Западный	0.51	0	0.58	18	0.41	4	0.48	0	0.59	1
Центральный	0.59	0	0.53	14	0.44	2	0.75	0	0.64	0
Приволжский	0.50	0	0.29	40	0.46	3	0.55	1	0.74	0
Южный	0.54	0	0.37	18	0.37	6	0.78	0	0.65	0
Северо-Кавказский	0.40	0	0.27	18	0.25	7	0.54	0	0.53	1
Уральский	0.36	4	0.11	100	0.64	1	0.25	14	0.48	9
Сибирский	0.30	2	–0.02	100	0.66	0	0.34	0	0.31	18
Дальневосточный	0.48	0	0.20	24	0.58	0	0.46	0	0.67	0

Примечание: Жирным шрифтом выделены коэффициенты тренда, значимые на 5%-м уровне; курсивом – те из них, которые статистически значимы уже на 1%-м уровне.

Оценка изменения возможных среднегодовых температур воздуха в выделенных районах (муниципальных образованиях) АЗРФ выполнялась, как указывалось ранее, на основе сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (п. 2.1). Все три сценария учитывались и выбирались максимальная и минимальная оценки. В других, альтернативных, расчетах использовались тренды изменения температур воздуха за последние десятилетия. В частности, принимались в расчет тренды изменения температур воздуха (табл. 4) по [1].

Результаты расчетов сведены в табл. 5. Расчет с учетом снега и растительности и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 показал, что изменения прочности смерзания грунтов с материалом фундамента во всех случаях и во всех возможных диапазонах свойств мерзлых и талых грунтов превышают 15%. Таким образом, в этом

случае устойчивость грунтов не обеспечивается (вариант 1). Если использовать тренды температур воздуха из табл. 4, изменения также не обеспечивают несущую способность (вариант 2).

Если рассчитывать температуры грунтов и, соответственно, прочность смерзания грунтов с материалом фундамента без учета влияния снега и растительности по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, что характерно для территорий застройки и проветриваемых подполий зданий (вариант 3), то изменения продолжают оставаться максимальными (см. табл. 5). Если же при этом используются тренды температур воздуха из табл. 4, при благоприятном сочетании грунтовых условий ущерб сокращается почти на порядок (вариант 4).

В свое время были определены тренды изменения температур воздуха и грунтов, и найдены коэффициенты соответствия между ними для различных регионов (табл. 6). Таким образом, зная

Таблица 5. Расчет ущерба применительно к зданиям и сооружениям по всем видам экономической деятельности при различных сценариях

Варианты	Ущерб, млн руб.		Описание
	min	max	
1	Максимальный (9614862.25)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. для естественных условий
2	Максимальный (9614862.25)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха [1] для естественных условий
3	Максимальный (9614862.25)		По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий) по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
4	979704.55	8080641.21	По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий), с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха [1]
5	3999389.33	9614862.25	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
6	Менее 50 млрд руб.	8417438.29	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
7	6251189.56	9606920.00	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
8	Менее 50 млрд руб.	7578109.49	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
9	9543263.80	9614862.25	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C до 3°C по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
10	Менее 50 млрд руб.	2145121.54	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2°C до 3°C по сравнению с температурой воздуха, для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 (для нарушенных условий)
11	345690.41	9614862.25	По СП 25.13330.2012 [6] для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
12	49707.27	9606491.11	По СП 25.13330.2012 [6] для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 [1] (для нарушенных условий)

Таблица 6. Линейные тренды ($\alpha_{ТВ}$ и $\alpha_{ТП}$) среднегодовых значений температуры воздуха и пород (соответственно $T_{В}$ и $T_{П}$) за 1965–2010 гг. на Севере России (Павлов, 2008; Методы оценки..., 2012, раздел 8, с дополнениями Г.В. Малковой) из [1]

Регион	Число пунктов наблюдения	Тренды $T_{В}$ и $T_{П}$, °C/год		$K\alpha = \alpha_{ТВ}/\alpha_{ТП}$
		$\alpha_{ТВ}$	$\alpha_{ТП}$	
Север Европейской части России	6	0.033	0.024	0.72
Север Западной Сибири	6	0.044	0.031	0.70
Средняя Сибирь	7	0.045	0.025	0.56
Якутия	10	0.046	0.033	0.72
Юг Сибири	4	0.045	0.022	0.49
Прибайкалье, Забайкалье	3	0.042	0.034	0.81
Северо-Восток России	5	0.036	0.024	0.67
Север России в целом	41	0.042	0.028	0.66

Таблица 7. Расчеты ущерба по жилому фонду МО АЗРФ при различных сценариях

Варианты	Ущерб, млн руб.		Описание
	min	max	
1	Максимальный (1130 417.11)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и сценариев изменения климата RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 для естественных условий
2	Максимальный (1130 417.11)		По методике [4] с учетом снега и растительности, и наблюдающихся трендов изменения температуры воздуха [1] для естественных условий
3	Максимальный (1130 417.11)		По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий) по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5
4	103820.21	856629.81	По методике [4] без учета влияния снега и растительности (для нарушенных условий), с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха [1]
5	801081.49	113017.11	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов, и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
6	Менее 50 млрд руб.	672214.30	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по Геокриологической карте (1991) для естественных условий
7	870101.90	1127619.60	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов, и трендам изменения температур воздуха по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
8	Менее 10 млрд руб.	665440.66	По коэффициентам корреляции [1] изменения температур воздуха и грунтов, с наблюдающимися трендами изменения температуры воздуха. Исходные температуры по литературным и фондовым источникам для естественных и нарушенных (при наличии) условий
9	1078775.15	1130417.11	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2 до 3°C по сравнению с температурой воздуха для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
10	Менее 10 млрд руб.	259379.37	При условии, что температуры грунтов в подпольях зданий выше от 0.2 до 3°C по сравнению с температурой воздуха, для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 (для нарушенных условий)
11	18765.72	1127155.03	По СП 25.13330.2012 для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (для нарушенных условий)
12	18765.72	1119204.68	По СП 25.13330.2012 для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 (для нарушенных условий)

будущие температуры воздуха, можно прогнозировать (строго говоря, для естественных условий) будущие температуры грунтов. Исходные температуры грунтов для настоящего времени для регионов могут быть либо взяты с Геокриологической карты СССР (1991)¹⁰, либо из литературных [2] или фондовых источников.

Такой расчет был сделан сначала для климатических сценариев по RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 (вариант 5), а затем для трендов изменения температуры воздуха из табл. 4 [1] при возможных диапазонах изменений свойств грунтов (вариант 6) с исходными температурами грунтов с Геокриологической карты СССР (1991), а также с исходными температурами грунтов по литературным и фондовым источникам (соответственно, варианты 7 и 8).

¹⁰URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_26860

В целом, по-видимому, можно предполагать ущерб для зданий или инженерных сооружений в АЗРФ к середине столетия около 5–7 трлн руб. или больше (рис. 2). В целом это согласуется с предыдущими оценками, несколько отличаясь в ту или иную сторону в целом [11, 10, 17], хотя мы рассматривали только несущую способность фундаментов жилых и промышленных зданий, и заметно выше, чем результаты работы [16].

Ущерб жилому фонду (см. табл. 7) ожидается примерно, как и стоимость основных жилых фондов, на порядок меньше, около 700 млрд руб. к середине столетия.

Следует иметь в виду, что деформации и разрушения зданий и инженерных сооружений в АЗРФ будут развиваться постепенно, и, вероятно, несколько отставать от изменений температурного режима грунтов.

В данной работе рассматривалась только АЗРФ. Большие территории криолитозоны, где изменения температур грунтов также будут происходить и сопровождаться, возможно, еще большими деформациями и разрушениями, например, Забайкалье (г. Чита), Центральная Якутия (г. Якутск, Мирный), Магаданская область (г. Магадан) и др., также следует рассматривать, как территории, где в будущем можно ожидать крупный ущерб, и включить их в систему будущего мониторинга криолитозоны.

Некоторые (возможно, немалые) поправки к прогнозным расчетам могут иметь место в связи с особенностями цикличности потеплений-похолоданий климата в XXI в., как это было и в прошлом столетии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев и др.; М.: Росгидромет, 2014. 1007 с. ISBN 978-5-9631-0322-7.
2. *Геокриология СССР*. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989.
3. Климатический центр Росгидромета “Изменение климата России в 21-м веке” URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>
4. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Кол. авт. В.А. Кудрявцев, В.Г. Меламед, Л.С. Гарагуля и др. / Под ред. А.В. Брушкова, Л.С. Гарагули. М.: МГУ, 2016.
5. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 12. С. 1228–1239.
6. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 2012. <http://docs.cntd.ru/document/1200095519>
7. *Badina S.V.* Prediction of socioeconomic risks in the cryolithic zone of the Russian Arctic in the context of upcoming climate changes // Studies on Russian Economic Development. 2020. V. 31. №. 4. P. 396-403.
8. *Burke, M., Hsiang S.M., Miguel E.* Global non-linear effect of temperature on economic production // Nature. 2015. 527: 235.
9. *Euskirchen, E., Goodstein E., Huntington, H.* An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere // Ecological Applications. 2013. 23: 1869-1880.
10. *Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al.* Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nature communications. 2018. V. 9 (1). 5147. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
11. *Hope, C., Schaefer, K.* Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost // Nature Climate Change. 2016. V. 6. № 1. P. 56–59. <https://doi.org/10.1038/nclimate2807>
12. IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Fifth Assessment Report. Geneva: 2014.
13. *Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., et al.* Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation // Proc. of the National Academy of Sciences. 2017. 114(2): E122–E131.
14. *Shiklomanov N., Streletskiy D., Suter L.* Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // Polar Geography. 2019. № 42. P. 267–286.
15. *Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E.* Permafrost, infrastructure and climate change: a GISbased landscape approach to geotechnical modeling // Arctic, Antarctic, Alpine Res. 2012. V. 44. P. 368–380.
16. *Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., Porfiriev B.N., Eliseev D.O.* Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 025003. P. 1–15.
17. *Yumashev, D., Hope, C., Schaefer, K. et al.* Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. Nat Commun 10, 1900 (2019).

DAMAGE ASSESSMENT FOR RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL BUILDINGS AND STRUCTURES DUE TO TEMPERATURES CHANGE AND PERMAFROST THAWING IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION BY THE MIDDLE OF THE XXI CENTURY

V. P. Melnikov^{a,b,#}, V. I. Osipov^{c,##}, A. V. Brouchkov^{d,###}, S.V. Badina^{e,f,####}, D. S. Drozdov^a, V. A. Dubrovin^{g,#####}, M. N. Zheleznyak^{h,#####}, M. R. Sadurtdinov^a, D. O. Sergeev^{c,#####}, N. A. Ostarkov^{i,#####}, A. A. Falaleeva^d, and Y. Yu. Shelkov^d

^a Institute of the Earth's Cryosphere TyumSC SB RAS, ul. Malugina, 86, Tyumen, 625026 Russia

^b ANO "Provincial Academy", ul. Malugina, 86, Tyumen, 625026 Russia

^c Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

^d Geology Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^e Institute of Economic Forecasting RAS, Nakhimovskii pr., 47, Moscow, 117418 Russia

^f Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny per., 36, Moscow, 117997 Russia

^g Gidropetsgeologiya, ul. Marshala Rybalko, 4, Moscow, 123060 Russia

^h Melnikov Permafrost Insitute RAS, ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010 Russia

ⁱ FASI "Vostokgosplan", ul. Lev Tolstoy, 8, Khabarovsk, 119121 Russia

[#]E-mail: sciensec@ikz.ru

^{##}E-mail: osipov@geoenv.ru

^{###}E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

^{####}E-mail: bad412@yandex.ru

^{#####}E-mail: info@specgeo.r

^{#####}E-mail: fe@mpi.ysn.ru

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

^{#####}E-mail: n.ostarkov@vostokgosplan.ru

An attempt was made to assess the possible damage from the loss of the bearing capacity of the foundations of buildings and structures for various warming scenarios in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) by 2050. The assessment was done separately for 39 municipalities of the AZRF, where permafrost is spread. The change in the average annual ground temperatures was evaluated on the basis of forecast data from the Climatic Center of Rosgidromet and scenarios of climate change RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, air and ground temperatures changes trends and actual data on temperatures in the building bases. The mean annual temperature of grounds (MATG) differs from the mean annual air temperature (MAAT) by the value of the shift, which consists in the influence of radiation correction, snow, vegetation, ground shift and the influence of atmospheric precipitation. The total temperature shift was estimated in two ways, i.e., calculated taking into account the possible changes in parameters due to climate change and according to data on the total slide observed in the areas of the AZRF. Calculations were carried out by the Kudriavtsev method and according to the Construction Rules 25.13330.2012 for possible range of ground properties, all scenarios were taken into account as options, and maximum and minimum damage was calculated. It was assumed that most of buildings and engineering structures were built with the preservation of permafrost, piles being the most common foundation type. The change in their bearing capacity was estimated, and if the safety threshold was exceeded according to the Construction Rules 25.13330.2012, buildings were considered as damaged. Buildings and engineering structures statistics was obtained mostly from the open sources on the base of the authors' method. Damage for buildings and engineering structures in the AZRF by the middle of the century is evaluated in range of about 5–7 trillion rubles, which is consistent in general with other estimates. Damage for housing is expected to be about 700 billion rubles.

Keywords: damage assessment, Arctic zone of the Russian Federation, permafrost, temperature changes, thawing, residential and industrial buildings, bearing capacity of froze n ground

REFERENCES

1. Alekseev, G.V. et al. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na teritorii Rossiiskoi Federatsii* [The second Rosgidromet assessment report on climate change and its consequences in the Russian Federation]. Rosgidrom-
2. *Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir'* [Geocryology of the USSR. Western Siberia], Ershov, E.D., Ed., Moscow, Nedra, 1989. (in Russian)
3. *Klimaticheskii tsentr Rosgidrometa. "Izmenenie klimata Rossii v 21m veke"* [Roshydromet Climate Center, et, 2014. URL: http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_ob_eng.pdf (in Russian)]

- “Russian Climate Change in the 21st Century”]. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke> (in Russian)
4. Kudryavtsev, V.A., Melamed, V.G., Garagulya, L.S. et al. *Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh* [The basics of the permafrost forecast in engineering and geological research]. Brouchkov, A.V., Garagulya, L.S., Eds., Moscow, MGU Publ., 2016. (in Russian)
 5. Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O., Streletskiy, D.A. *Ekonomicheskaya otsenka posledstviy degradatsii vechnoi merzloty pod vliyaniem izmenenii klimata dlya ustoychivosti dorozhnoi infrastruktury v Rossiiskoi Arktike* [Economic assessment of the effects of permafrost degradation under the influence of climate change on the sustainability of road infrastructure in the Russian Arctic]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2019, vol. 89, no. 12, pp. 1228–1239. (in Russian)
 6. SP 25.13330.2012. *Osnovaniya i undamenty na vechno-merzlykh gruntakh* [Construction Rules of Russian Federation. SP 25.13330.2012 Foundations and foundations on permafrost ground]. Moscow, 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095519> (in Russian)
 7. Badina, S.V. Prediction of socioeconomic risks in the cryolithic zone of the Russian Arctic in the context of upcoming climate changes. *Studies on Russian Economic Development*. 2020, vol. 31, no. 4, pp. 396–403.
 8. Burke, M., Hsiang S.M., Miguel, E. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 2015, no. 527, p. 235.
 9. Euskirchen, E., Goodstein, E., Huntington, H. An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere. *Ecological Applications*, 2013, no. 23, pp. 1869–1880.
 10. Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature communications*, 2018, vol. 9(1), p. 5147. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
 11. Hope, C., Schaefer, K. Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. *Nature Climate Change*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 56–59. DOI: 10.1038/nclimate2807
 12. IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Fifth Assessment Report. Geneva, 2014.
 13. Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., et al. Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2017, no. 114, pp. E122–E131.
 14. Shiklomanov, N., Streletskiy, D., Suter, L. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019, no. 42, pp. 267–286.
 15. Streletskiy, D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling. *Arctic, Antarctic, Alpine Res.* 2012, vol. 44, pp. 368–380.
 16. Streletskiy, D.A., Suter, L., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environ. Res. Lett.*, 2019, vol. 14, no. 025003, pp. 1–15.
 17. Yumashev, D., Hope, C., Schaefer, K. et al. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nat. Commun.* 2019, no. 10, p. 1900.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.1: 551.252

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОБЛАСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ТОЛЩИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНОУРОВНЕВОЙ МНОГОКАМЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ СОЛЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

© 2021 г. Ю. А. Мамаев^{1,*}, А. Н. Власов^{2,**}, М. Г. Мнушкин¹, П. В. Стольников¹

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

² Институт прикладной механики РАН, Ленинградский пр., д.7, Москва, 125040 Россия

*E-mail: mamaev47ya@mail.ru

**E-mail: iam@iam.ras.ru

Поступила в редакцию 16.09.2020 г.

После доработки 15.10.2020 г.

Принята к публикации 05.11.2020 г.

В статье рассматриваются результаты математического моделирования процессов изменения напряженно-деформированного состояния и структуры области деформаций подрабатываемой толщи пород при последовательной многокамерной отработке залежи солей Верхнекамского калийного месторождения (ВКМКС) на территории Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации (СБГПА). Приводятся методические особенности разработки геомеханической модели участка и составления конечно-элементной расчетной схемы с выбором расчетных показателей свойств пород и граничных условий расчетной области. Дается описание характера и параметров изменения структуры области деформаций в подрабатываемом массиве пород надсоляной толщи при создании единичных и блоков камер, расположенных рядом на одной глубине. Результаты исследований важны для прогнозирования опасных процессов и принятия защитных мер на подрабатываемых территориях.

Ключевые слова: *месторождение калийных солей, инженерно-геологические условия, напряженно-деформированное состояние массива горных пород, подрабатываемая толща, математическое моделирование*

DOI: 10.31857/S0869780921010069

ВВЕДЕНИЕ

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) в Пермском крае является самым крупным в Российской Федерации. В границах Предуральяского краевого прогиба месторождение протягивается в меридиональном направлении почти на 140 км и состоит из сомкнутых крупных блоков шириной от первых до первых десятков километров, разделенных субширотными сдвиговыми зонами. Месторождение разрабатывается шахтным способом с 1954 г. При отработке залежи калийных солей нередки случаи образования на земной поверхности участков оседания (мульд сдвижения) и провалов, что обусловливается составом, состоянием и свойствами горных пород; их значительной полигенетической трещиноватостью, обводненностью, а также изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов пород, вмещающих горные выработки больших размеров и технические системы добычи соли [1, 3].

С начала строительства подземных выработок (камер) по настоящее время в границах горных отводов рудников на поверхности земли сформировались и продолжают развиваться мульды оседания глубиной от 2 до 5.5 м. В 1986, 1995, 2006, 2014 и 2015 гг. на 3-х (из 15-ти) рудниках произошли крупные аварии с частичным и полным затоплением выработанного подземного пространства. Это привело к формированию 6 крупных провалов земной поверхности овальной формы с плановыми размерами от 110 до 400 м, глубиной до 90 м. Развитие мульд сдвижения и провалов сопровождалось значительными изменениями рельефа аварийных участков, сейсмического режима, активизацией гидрогеохимических и газогеохимических процессов, существенными изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород разрабатываемых и перекрывающих толщ [1, 4, 6].

В составе научно-исследовательских работ по оценке и прогнозированию инженерно-геологических условий развития деформаций земной по-

верхности подрабатываемых территорий были выполнены модельные исследования изменения НДС массивов горных пород при строительстве одиночных камер и их блоков.

Цель работ – установление закономерностей изменения структуры и размеров области деформаций пород в подрабатываемой толще при увеличении количества подземных выработок.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения задач численного моделирования процессов изменения НДС массивов горных пород при отработке залежи калийных солей был собран, проанализирован и структурирован фондовый материал, а также данные из опубликованных источников, нормативных документов и научно-технических отчетов.

Территории разрабатываемых и аварийных рудников ВКМКС схожи по геологическому строению, в котором основное значение имеют коренные породы нижнепермского возраста уфимского и кунгурского ярусов ($P_{1sl,2}$; P_{1k}) и перекрывающие пласты солей. По преобладающему петрографическому составу пород в геологическом разрезе выбранного типичного участка одного из калийных рудников (Южно-Юрчукского) сверху вниз выделяют несколько толщ:

– фрагменты шешминской пестроцветной терригенной толщи (ПТТ), представленные переслаивающимися слоями песчаников, мергелей, глинистых известняков и аргиллитов мощностью от первых до 50 м;

– терригенно-карбонатная толща (ТКТ), мощностью до 170 м, представленная мергелями, глинистыми загипсованными известняками с прослоями песчаников, алевролитов и карбонатных глин;

– соляно-мергельная толща (СМТ), мощностью до 100 м, сложенная мергелями с прослоями известняков, известковистых глин и гипса, включающая до семи пластов каменной соли, мощностью до 3 м;

– соляная толща (СТ), общей мощностью до 600 м, состоящая из мощных горизонтов каменной соли, вмещающих пласты калийных солей сильвинита и карналлита мощностью от 0.5 до 5.5 м, которые разрабатываются камерным способом, формирующим целые блоки камер, имеющих большие объемы (тыс. и млн м³).

В кровле слоистой соляной толщи залегает покровный пласт каменной соли мощностью до 20 м, перекрывающий залежь калийных солей мощностью до 60 м. Наиболее мощный пласт (до 5.5 м) калийной соли – сильвинита (Красный II), подстилается толщей каменной соли мощностью до 340 м.

Нижняя необводненная часть соляно-мергельной толщи и покровный пласт каменной соли общей мощностью до 100 м являются водозащитной толщей по отношению к продуктивной толще калийных солей.

В надсоляной толще с поверхности до глубины до 80–90 м развиты процессы гипергенеза, разгрузки напряжений, трещинообразования и развития карста в условиях высоко агрессивной среды. Особенности геологического разреза выбранного участка исследований и обобщенные показатели физико-механических свойств горных пород приведены в статье [4, с. 52, таблица]. Физико-механические свойства горных пород обосновывались и выбирались, исходя из данных лабораторных испытаний горных пород, а также соотношения скоростей сейсмических волн, регистрируемых в полевых условиях в соответствующих элементах геологического разреза. Эта информация корректировалась на основе анализа данных по другим участкам месторождения и различным литературным источникам [2, 3, 5 и др.].

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

С учетом физико-механических свойств горных пород и требования выполнения условий геометрического и физического подобия разработана геомеханическая модель геологической среды моделируемого участка месторождения. На основе геомеханической модели для задач численного моделирования влияния способа отработки калийной залежи на структуру и величины полей напряжений и деформаций в подрабатываемой надсоляной толще пород составлена конечного-элементная расчетная схема.

В натуральных условиях разрабатываемые продуктивные слои калийных солей залегают на глубинах от 180 до 350 м, а вызванные их отработкой деформации (мульды сдвигания и провалы) формируются на земной поверхности. Это означает, что изменения НДС пород затрагивают очень большие массивы пород.

При выполнении численных расчетов приняты следующие граничные условия:

– подземные выработки (камеры) создавались на одном уровне на глубине 265 м;

– размеры камер арочного профиля составляли: ширина и высота камер, соответственно, 13 и 15 м, ширина поддерживающих межкамерных цилиндров 10 м;

– на поверхности расчетной области – свободное перемещение узлов по всем направлениям;

– на боковых границах расчетной области – свободное перемещение в вертикальном направлении (вдоль оси Y) и запрет на горизонтальные перемещения (вдоль оси X); размеры расчетной

области модели значительно превышали размеры моделируемого подрабатываемого участка, что дополнительно обеспечивало соблюдение граничных условий на вертикальных границах моделируемого участка;

– на подошве расчетной области, на глубине около 1 км – запрет на перемещения по всем направлениям.

Скальные породы и соляные пласты моделировались с использованием модели Хоека–Брауна [7], а дисперсные породы – с использованием идеально-упругопластической модели Друкера–Прагера [8]. При этом информация о строении и физико-механических свойствах горных пород в пределах выделенных инженерно-геологических слоев распространялась на всю расчетную область. Численное моделирование осуществлялось в 2D-постановке (в условиях плоской деформации). Расчетная модель включала в себя массив горных пород с размерами основания ~9900 м. Рассматриваемая область аппроксимировалась четырехугольными элементами второго порядка (4 узла в углах + 4 узла на сторонах элемента).

В геомеханических расчетах принималось, что основное естественное напряженное состояние пород надсоляной толщи литостатическое (вертикальное напряжение $\sigma_y^0 = \gamma H$, горизонтальное $\sigma_x^0 = \frac{\nu \gamma H}{1 - \nu}$, где ν – коэффициент Пуассона), а в интервале соляной толщи – гидростатическое $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \gamma H$ [2, 4, 6].

Модельные исследования проводились поэтапно. Сначала определялось начальное НДС массивов пород, обусловленное силами гравитации и исходным геологическим строением выбранного участка. Затем моделировалось изменение НДС массивов пород при последовательном создании от одной до тринадцати подземных камер в толще калийной залежи. При этом напряжения и деформации, рассчитанные на предыдущей стадии, рассматривались в качестве исходных для последующей стадии. Численная реализация расчетной схемы проводилась по стандартному алгоритму метода конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные модельные исследования позволили качественно и количественно охарактеризовать основные закономерности изменений структуры полей напряжений и деформаций в массивах пород соляной и надсоляной толщ при сооружении горных выработок.

1. При строительстве блока подземных камер, расположенных рядом на одной глубине, в подра-

батываемой толще пород происходит изменение структуры полей напряжений и деформаций, а также их абсолютных значений. Ниже рассмотрены изменения, преимущественно, вертикальных деформаций в надсоляной толще пород.

При создании одной и двух камер в толще вышележащих пород, примыкающей к сводовой части камер, формируются эллипсоидные области разгрузочных напряжений и деформаций небольшой величины. Размеры этих областей в несколько раз превышают размеры выработок и могут достигать в высоту 80–85 м, а в ширину 110–115 м. При этом в основании камер формируется зона небольших растягивающих напряжений и деформаций и изгибающих моментов.

При строительстве 3-х камер их общая область вертикальных деформаций значительно увеличивается в высоту, достигая поверхности земли (250 м), и в ширину до 160 м. При этом непосредственно над сводами камер формируются дополнительные эллипсоидные (реже шаровидные) зоны с более высокими значениями вертикальных напряжений и деформаций. Зона растягивающих напряжений и небольших деформаций, расположенная ниже пола камер увеличивается по глубине и ширине до, соответственно, 40 и 75 м (рис. 1).

При создании в модели блока из 4–8 камер в надсоляной толще пород наблюдается формирование единого свода значительных по величине вертикальных напряжений и деформаций, верхняя граница которого может достигать земной поверхности (рис. 2). В пределах единого свода устанавливаются куполообразные зоны с разными значениями вертикальных напряжений и деформаций, абсолютные величины которых возрастают по мере увеличения количества камер и приближения к контурам выработок.

При создании панели подземных камер, состоящей из 9–13 камер, шириной, соответственно, от 170 до 250 м, от ее границ к дневной поверхности формируется область перевернутой трапецевидной формы, в пределах которой вертикальные деформации достигают десятков сантиметров, формируются мульды сдвижения, и при дополнительных условиях, а именно, высокой трещиноватости и обводненности пород, возникают условия для образования провалов (рис. 3). Ширина данной области деформаций на поверхности земли (основание перевернутой трапеции) может быть в 3 и более раз больше ширины панели камер. Субвертикальные границы зон с разными значениями вертикальных напряжений и деформаций сохраняются лишь несколько видоизменяясь (сужаясь или расширяясь) на границах толщ пород разного литологического состава. Это означает, что ширина и форма границ трапе-

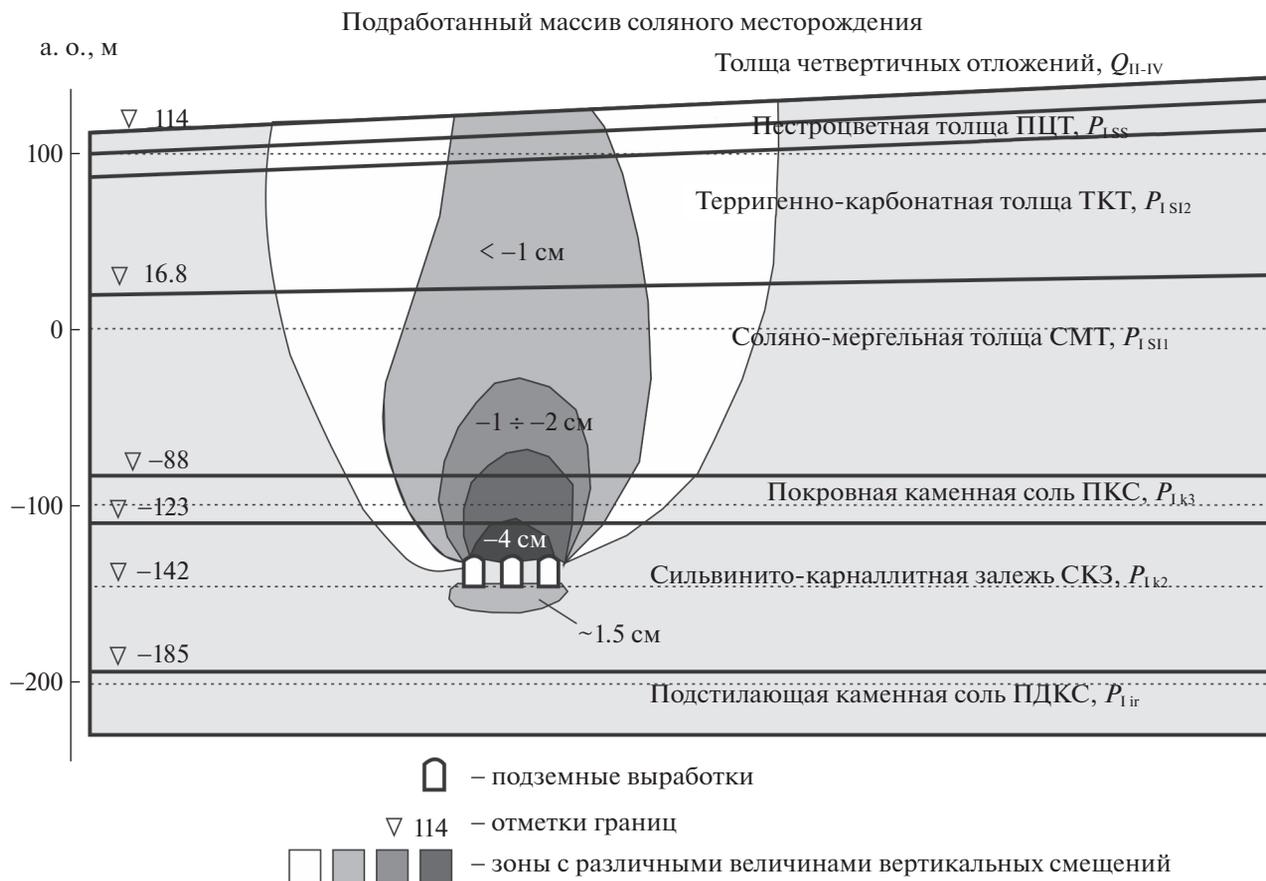


Рис. 1. Структура области вертикальных деформаций подработанной толщи пород при малом количестве подземных выработок (3 камеры).

цевидной области деформаций по глубине разреза зависит от состава и свойств вмещающих пород.

2. Результатами моделирования определено, что последовательное увеличение количества подземных выработок, расположенных на одном уровне, приводит к увеличению абсолютных значений вертикальных деформаций, формирующихся на одной глубине. Например, на глубине залегания кровли слоя покровной каменной соли (ПКС, P_{1k3}) при строительстве 3-х подземных камер значения возможных вертикальных деформаций составляют 2–4 см; при сооружении блока из 4–8 камер величины возможных деформаций увеличиваются до 11–14 см, а при создании панели подземных выработок из 13 камер вертикальные деформации могут достигать 20 см. Эта закономерность и при других значениях вертикальных деформаций прослеживается по всему разрезу надсоляной толщи.

3. Расчетами установлено значительное увеличение интенсивности касательных напряжений в массиве пород при увеличении в нем количества горных выработок, что существенно влияет на их устойчивость.

4. На общую устойчивость горных выработок определяющее влияние оказывают состав, состояние и физико-механические свойства пород, слагающих кровлю выработок и межкамерные целики, в которых возможно формирование трещин скола, а также наличие зон крупных тектонических нарушений с повышенной трещиноватостью и ослабленными свойствами пород. Ширина зон влияния отдельных крупных тектонических нарушений по данным моделирования может достигать от первых десятков до 200 м.

Все случившиеся на территории СБГПА провалы, а именно: провал 1986 г. на руднике БКПРУ-3; провалы 2007, 2010, 2011 и 2015 гг. на руднике БКПРУ-1; провал 2014 г. на руднике СКРУ-2, происходили в толщах терригенно-карбонатных пород, в зонах влияния крупных тектонических нарушений и имели глубину 80–90 м. Отметим, что шахтные выработки располагались на значительно больших глубинах: 180–350 м. Нижняя граница зоны гипергенеза коренных пород по данным бурения и геофизики располагается также на глубинах 80–90 м. Ниже залегают относительно сохраненные, менее выветрелые и трещиноватые породы.

5. Установленные при численном моделировании расчетные величины деформаций и размеры

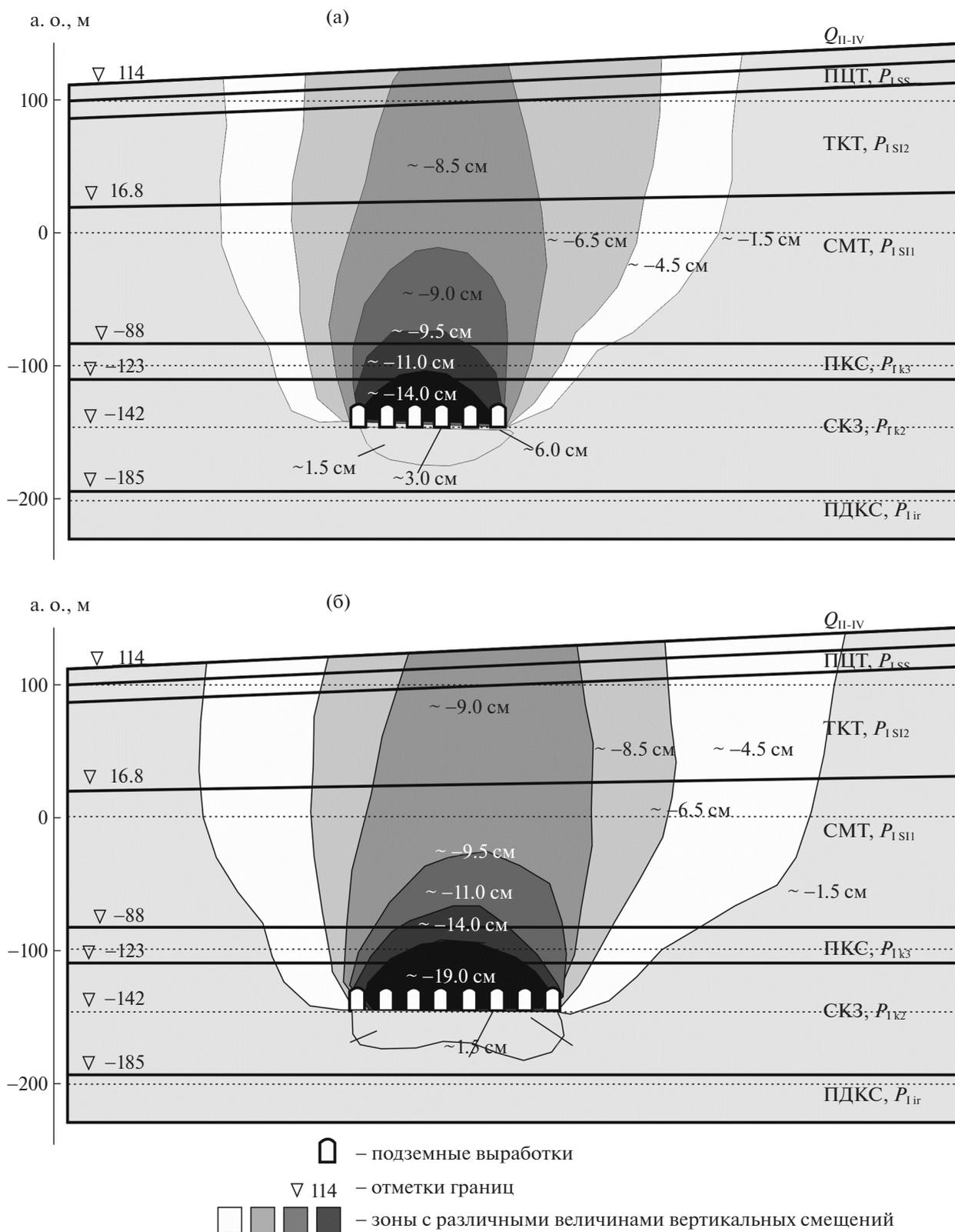


Рис. 2. Зональность общего свода напряжений и вертикальных деформаций в подработанной толще пород при количестве подземных выработок: а – 6 камер; б – 8 камер.

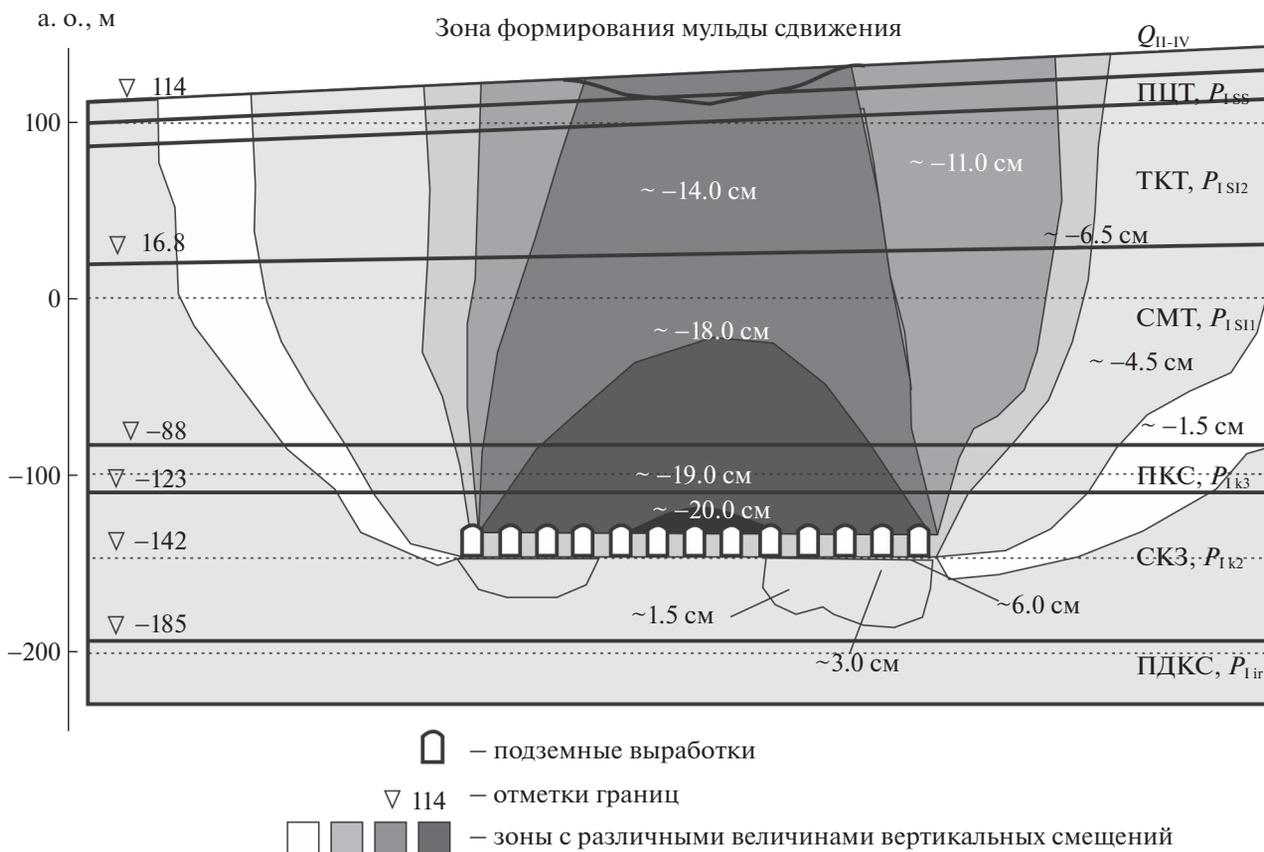


Рис. 3. Структура области вертикальных деформаций в подработанной толще пород при большом количестве подземных выработок (13 камер).

зон изменения напряженно-деформированного состояния массивов пород, получены на расчетных схемах, в которые закладывались имеющиеся, преимущественно, стандартные (условно мгновенные) показатели прочностных и деформационных свойств, определяемые по схемам быстрых геотехнических испытаний горных пород. В конкретных геологических условиях рассматриваемой территории при длительном освоении подземного пространства (десятки лет) и, следовательно, длительном воздействии напряжений происходит постепенное значительное снижение прочности горных пород, характеризуемое понятием “длительной прочности”, показатели которой всегда значительно меньше стандартной прочности. При учете в моделях реологических свойств пород, которые характеризуют деформации ползучести горных пород при долговременном силовом воздействии на них, величины деформаций пород при подземной отработке залежи калийных солей в массиве и на дневной поверхности будут значительно (примерно, на порядок) больше. По данным натурных наблюдений на земной поверхности они достигают 4–5 м [1, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Над подземными горными выработками большой площади и объема (панели камер) формируются объемные зоны измененного НДС горных пород, в пределах которых напряжения меняются с сжимающих (геостатических) на растягивающие, действующие, в том числе, вблизи дневной поверхности и контуров подземных выработок. При деформировании и разрушении горных пород вокруг выработок вместе с развитием трещин меняются деформационные характеристики массива пород, включающего участки относительно сохранных блоков горных пород и зоны нарушений. Развитие деформаций в этих зонах приводит к формированию куполов обрушения над выработками. При этажном (друг над другом) расположении подземных камер могут развиваться весьма сложные зоны разрушений в массивах горных пород, которые могут достигать земной поверхности, образуя участки оседаний и провалы [1].

Полученные результаты модельных исследований важны для прогнозирования опасных процессов и планирования необходимых защитных мер на подрабатываемых территориях горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзаковский Б.А., Марakov В.Е., Теннисон Л.О. Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО "Уралкалий" на городскую и промышленную застройку г. Березники. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 381–396.
2. Виттке В. Механика скальных пород. М.: Недра, 1990.
3. Власов С.Н., Маковский А.В., Меркин В.Е. и др. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. М.: ТИМР, 2000. 195 с.
4. Мамаев Ю.А., Власов А.Н., Мнушкин М.Г., Ястребов А.А. Изучение напряженного состояния и механизма деформирования массивов горных пород при образовании природно-техногенных карстовых провалов // Геоэкология. 2019. № 1. С. 46–59.
5. Оловянный А.Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб.: Стресс, 2003. 234 с.
6. Осипов В.И., Барях А.А., Санфиоров И.А., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Карстовая опасность при затоплении калийного рудника в г. Березники Пермского края Российской Федерации // Геоэкология. 2014. № 4. С. 356–361.
7. Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition // Proc. of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada. V. 1. 2002. P. 267–273.
8. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. V. 10. № 2. P. 157–165.

CHANGING STRUCTURE OF DEFORMATION AREA OF UNDERMINED ROCK LAYER UPON ONE-LAYER MULTICHAMBER MINING OF SALT DEPOSIT

Yu. A. Mamaev^{a, #}, A. N. Vlasov^{b, ##}, M. G. Mnushkin^a, and P. V. Stol'nikova^a

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii pr., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

^b Institute of Applied Mechanics RAS, Leningradskii pr., 7, Moscow, 125040 Russia

[#] E-mail: mamaev47ya@mail.ru

^{##} E-mail: iam@iam.ras.ru

The paper presents the results of mathematical simulation of variation in the stress-strain state and the deformation area structure in the undermined rock layer upon the successive multi-chamber mining of the salt layer at the Verkhnekamskoe potassium deposit (VKMKS) within the territory of Solikamsk-Berezniki urban industrial agglomeration (SBGPA). The methodical specifics in the development of geomechanical model and compilation of finite-element calculation scheme are provided with choosing calculation parameters of rock properties and boundary conditions of the calculation area. The peculiar features and parameters of deformation zone structure variation in the undermined rock massif of the above-salt layer are described for the construction of a single chamber and a number of neighbor chambers at the same depth. The research results are important for prediction of hazardous processes and adoption of protective measures at the affected areas.

Keywords: potassium salt deposit, engineering geological conditions, stress-strain state, rock massif deformation, undermined massif, mathematical simulation

REFERENCES

1. Borzakovskii, B.A., Marakov, V.E., Tennison, L.O. *Prognoz negativnogo vliyaniya zatopeniya rudnika BKPRU-1 OAO "Uralkalii" na gorodskuyu i promyshlennuyu zastroyku g. Berезniki* [Prediction of negative influence of flooding Uralkalii Public Co. BKPRU-1 mine on the urban and industrial buildings in the town of Berезniki]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009, no. 7, pp. 381–396. (in Russian)
2. Vittke, V. *Mekhanika skal'nykh porod* [Hard rock mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1990. (in Russian)
3. Vlasov, S.N., Makovskii, A.V., Merkin V.E., et al. *Avariynye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonnelei i metropolitenov* [Emergencies in construction and operation of transport tunnels and metro]. Moscow, TIMR Publ., 2000, 195 p. (in Russian)
4. Mamaev, Yu.A., Vlasov, A.N., Mnushkin, M.G., Yastrebov A.A. *Izuchenie napryazhennogo sostoyaniya i mekhanizma deformirovaniya massivov gornykh porod pri obrazovanii prirodno-tekhnogennykh karstovykh provalov* [The study of stress state and the deformation mechanism of rock massifs upon the formation of natural-technogenic karst collapses]. *Geoekologiya*, 2019, no. 1, pp. 46–59. (in Russian)
5. Olovyanyni, A.G., *Nekotorye zadachi mekhaniki massivov gornykh porod* [Some tasks in rock massif mechanics]. St. Petersburg, Stress Publ., 2003, 234 p. (in Russian)
6. Osipov, V.I., Baryakh, A.A., Sanfirov, I.A., Mamaev, Yu.A., Yastrebov, A.A. *Karstovaya opasnost' pri zatopenii kaliynogo rudnika v g. Berезniki Permskogo kraya Rossiiskoi Federatsii* [Karst hazard upon flooding the potassium mine in the town of Berезniki, Perm krai, the Russian Federation]. *Geoekologiya*, 2014, no. 4, pp. 356–361. (in Russian)
7. Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Proc. of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada. Vol. 1. 2002. pp. 267–273.
8. Drucker, D.C., Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol.10, no 2, pp. 157–165.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 699.8:551.3

ФИТОГЕННЫЙ ПСЕВДОКАРСТ И УСЛОВИЯ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

© 2021 г. А. А. Лаврусевич^{1,*}, Т. А. Цуцупа^{2,**}, В. А. Салдин^{3,***}, И. А. Лаврусевич^{1,****}

¹ ФГБУ ВО НИУ “Московский государственный строительный университет”,
Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337 Россия

² ФГБОУ ВО “Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева”,
ул. Комсомольская, д. 95, г. Орел, 302026 Россия

³ ФГБУН Федеральный исследовательский центр “Коми научный центр Уральского отделения
Российской академии наук” ФИЦ Коми НЦ Уро РАН, ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982 Россия

*E-mail: lavrusevich@yandex.ru

**E-mail: tsutsupa@mail.ru

***E-mail: victorsaldin@yandex.ru

****E-mail: 4914907@gmail.com

Поступила в редакцию 05.10.2020 г.

После доработки 18.11.2020 г.

Принята к публикации 23.11.2020 г.

В статье приводятся данные о сложном геологическом процессе – подземной эрозии, проявлением которой является псевдокарст. Активное развитие этого процесса связано, как правило, с техногенезом особенно в последние десятилетия, и ставит этот опасный геологический феномен в один ряд с такими грозными процессами как оползни, сели, обвалы, карст и др. Представлена классификация основных видов псевдокарста. Приведен пример впервые выделенного вида псевдокарста, связанного с абиотическими и биотическими (растительность) факторами. Показано, что в природных условиях Северного и Приполярного Урала в прибровковой части террас развивается весьма необычный вид псевдокарста, который оказывает негативное влияние на устойчивость уступов террас. Специфика механизма и скорость развития “фитогенного” псевдокарста и отсутствие понимания условий его формирования, может инициировать развитие оползневого процесса или способствовать обвальному разрушению уступа террасы за счет последовательного циклического отступления бровки террасы в зоне развития подземной эрозии.

Ключевые слова: подземная эрозия, псевдокарст, корнеобитаемый слой, фитогенный псевдокарст, подземный эрозионный канал, Северный и Приполярный Урал, р. Щугор

DOI: 10.31857/S0869780921010057

ВВЕДЕНИЕ

Псевдокарст (ложный карст) – западинно-впадинный рельеф, образованный понижениями разного размера, внешне напоминающий карст, но возникший в результате иных процессов [6]. Более 100 лет идет дискуссия о содержании понятия “псевдокарст”. Изучению “карстоподобных” форм рельефа, образованных в результате иных процессов, посвящены многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов. Практически все авторы отмечают, что основное отличие псевдокарста от карстового процесса – отсутствие растворимых пород, состоящих из неустойчивых к воде минералов классов карбонатов, сульфатов и галоидов, хотя формы рельефа как подземные, так и поверхностные, одинаковы. Хотя, в литературе отмечены случаи техногенного псевдокарста в карбонатных породах [13]. Очевидно, в этом случае можно применить термин

“карст на подработанных территориях” [23]. Очень кратко остановимся на истории появления термина “псевдокарст” в научной литературе, так как это уже достаточно подробно изложено в следующих работах [9, 10, 12, 15 и др.].

Очевидно впервые термин “псевдокарст” появился в научной литературе в 1906 г., его ввел немецкий геолог Вальтер фон Кнебель. Известно, что он использовал это специальное обозначение в своей работе “Höhlenkundemit Berücksichtigung der Karstphänomene” (1906 г.) в конкретном применении к псевдокарстовому процессу [28]. Наблюдая как в Исландии водные потоки исчезают в трещиноватых базальтах, он под впечатлением увиденного записал: “Во многих областях распространения лавы, характерны водные потоки внутри лавового массива, что безусловно, является особенностью его структурно-текстурного

Таблица 1. Классификация псевдокарста

Виды псевдокарста (Types of Pseudokarst)	1	Псевдокарст в лавовых потоках – rheogenic pseudokarst (pseudokarst on lava flows)
	2	Внутриледниковый псевдокарст – glacier pseudokarst
	3	Трещинный псевдокарст, включая прибрежный псевдокарст – crevice pseudokarst, including littoral pseudokarst
	4	Псевдокарст в коллювиально-делювиальных отложениях (осыпях) – talus pseudokarst
	5	Псевдокарстовый бедленд, тоннели и пещеры в лессах – bedlands and piping loess pseudokarst
	6	Псевдокарст в вечной мерзлоте – permafrost pseudokarst
	7	Техногенный псевдокарст – technogenic pseudokarst
	8	Консеквентный псевдокарст – consequent pseudokarst
	9	<i>Псевдокарст в делювиально-пролювиальных отложениях – deluvial and proluvial pseudokarst</i>
	10	<i>Псевдокарст в аллювиально-пролювиальных отложениях – alluvial and proluvial pseudokarst</i>
	11	<i>Псевдокарст в ритмично чередующихся алевролитах и аргиллитах (флиш) – flysch pseudokarst (in aleurolites and argillites)</i>
	12	<i>Фитогенный псевдокарст – phytogenic pseudokarst</i>

Курсивом выделены вновь описанные (9–12) виды псевдокарста.

строения и это необходимо рассматривать как “псевдокарст” (pseudoverkarstung) [28, с. 171].

В Риме описываются псевдокарстовые пещеры в лавовых трубках на горе Этна [27]. Много работ, в которых косвенно описаны псевдокарстовые формы рельефа известные в большинстве стран Европы, по крайней мере, со времен средневековья. Но, перенесемся в конец XX, начало XI в. Точка определенности в отношении термина псевдокарст никак не ставилась в отечественной литературе вплоть до начала 1990-х годов. Началом нового этапа в изучении псевдокарста стало совещание по проблемам псевдокарста, прошедшее в 1992 г. в Перми, на котором присутствовали и выступали известные карстоведы В.Н. Андрейчук, Г.Н. Дублянская, В.Н. Дублянский и многие другие [1, 7], которые констатировали жизненность термина. Время не стоит на месте и в 1997 г., на 12 Международном Конгрессе по Спелеологии в Ла-Шо-де-Фоне (Швейцария) был организован комитет по изучению псевдокарста. Это явилось отправным моментом. Стали проходить регулярные международные псевдокарстовые конгрессы: Бразилия 2001 г., Греция 2005 г., Италия 2008 г., Италия 2012 г. и др. В 1997 г. на 12 Международном конгрессе ВМС (IUS) по итогам рабочей сессии, была принята следующая классификация псевдокарста [27], которую мы представим в виде таблицы (табл. 1).

Авторы, изучая псевдокарстовые явления на протяжении последних десятилетий, дополнили и расширили данную классификацию. В частности, изучая территорию Крымского полуострова, авторы пришли к выводу о достаточно широком развитии как уже описанных в таблице некоторых форм псевдокарста (прибрежный, лессовый, коллювиально-делювиальный, техногенный и др.),

так и вновь выделенных (номера 9–12) [11, 13]. Однако в литературе псевдокарстовые явления Крымского полуострова до настоящего времени освещены недостаточно, хотя существуют отдельные работы. Отсутствие должного внимания и непонимание механизма, причин и скорости развития этого процесса может привести в ближайшем будущем к разрушению уже существующих сооружений и вызвать формирование оползней-потоков в зонах активного рекреационного освоения.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый участок развития нового вида псевдокарста приурочен к территории, которая относится к бореально-континентальной области Европы и расположен в пределах двух регионов I порядка: Восточно-Европейской равнины и Уральской горной страны. Изучая бассейн р. Шугор (правобережный приток р. Печоры, Северный и Приполярный Урал) на территории заповедника Югид Ва Интинского района Республики Коми, авторы обнаружили уникальное явление псевдокарста, связанное исключительно с природными факторами (позиция 12 в табл. 1) – фитогенный псевдокарст.

Восточная часть территории Северного и Приполярного Урала уникальна своими разнообразными ландшафтами, что позволяет на протяжении всего нескольких километров увидеть и густую хвойную тайгу, и лиственный криволестье, и альпийские луга, и гольцовые тундры, что обусловлено разнообразием климатических, гидрологических, геоморфологических, тектонических и литолого-петрографических особенностей территории.

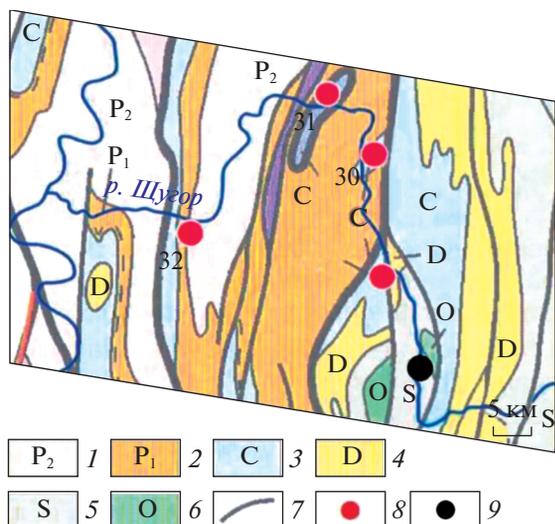


Рис. 1. Геологическая карта среднего и нижнего течения р. Шугор. Условные обозначения: 1, 2 – пермская система: 1 – верхний отдел; 2 – нижний отдел; 3 – каменноугольная система; 4 – девонская система; 5 – силурийская система; 6 – ордовикская система; 7 – тектонические нарушения; 8 – ОГН (объекты геологического наследия): 30 – Верхние Ворота; 31 – Средние Ворота; 32 – Нижние Ворота; 34 – Пристаньшорский разрез; 9 – участок развития фитогенного псевдокарста [5].

Река Шугор самый водоносный правобережный приток р. Печоры, питание которого обусловлено сбором воды с площади почти 10 000 км², при длине реки более 300 км [26]. Бассейн реки приурочен к двум крупным орографическим районам Урала, различным по строению; левый борт с меньшими гипсометрическими отметками и соответственно меньшей расчлененностью рельефа – это северная часть Северного Урала, и правый борт более возвышенный и расчлененный – южная часть Приполярного Урала. Географической границей между Приполярным и Северным Уралом является гора Тельпоз-из (высота 1650 м). Истоки реки находятся на высоте 720 м над уровнем моря на южном склоне горы Ярута в хребте Саран-из.

Там, где река прорезает прочные докембрийские и палеозойские карбонатные породы (от ордовикских до пермских) образуются живописные каньоны с высотой скал до 40–50 м. Несколько скальных обнажений, имеющих важное научное значение, отнесены к объектам геологического наследия: Нижние Ворота, Средние ворота, Верхние ворота и Пристаньшорский. В современном структурно-тектоническом плане Нижние, Средние и Верхние Ворота находятся в Большесынинской впадине Предуральского краевого прогиба, а Пристаньшорский, расположенный восточнее этих объектов, – в Западно-Уральской мегазоне (рис. 1) [5].



Рис. 2. Бечевник правого берега р. Шугор (недалеко от бывшего поселения Мичабечевник).

Долина реки хорошо сформирована. Русло реки глубокое, течение быстрое, долина просторная с широкими бечевниками (рис. 2). Вдоль русел р. Шугор и ее крупного притока Большой Паток выделяют 4 надпойменных террасы, образованные в соответствии с геологической историей формирования долины, которые фрагментарно прослеживаются вдоль левого и правого бортов реки.

На более мелких притоках выделяют обычно не более двух уровней надпойменных террас. Время формирования террас Шугора и его притоков неоплейстоцен-голоцен [18]. Аллювий террас представляет собой переслаивание мелких песков и песков средней крупности, нередко крупных, с включением гравия. В нижней части террасы идет огрубение материала до гравийно-галечникового (нередко в нижней прирусловой части с валунами). Редко встречается наклонная, вниз по течению, слоистость.

Аллювиальные отложения пестрого петрографического состава. На протяжении всей долины, через определенные промежутки, встречаются каменистые мелководные участки русла с быстрым течением – перекаты или шиверы, в среднем течении протяженный участок (порядка 2.5 км) представлен порогами. Из экзогенных геологических процессов ведущим является поверхностная эрозионная деятельность водотоков, а также выветривание, карст, оползни и обвалы. Поверхность террас имеет слабый наклон и сильно залесена.

Растительный мир территории разнообразен. На западном склоне Северного Урала преимущественно развиты средние и северо-таежные леса, преимущественно из сибирской ели, реже сибирской пихты, березы и кедра. Подлесок развит слабо. На гольцовых участках развиты мхи и ерники. Леса местами сильно заболочены. Это подтверждает споро-пыльцевой анализ пойменного аллювия. Содержание древесных до 60%, содержа-

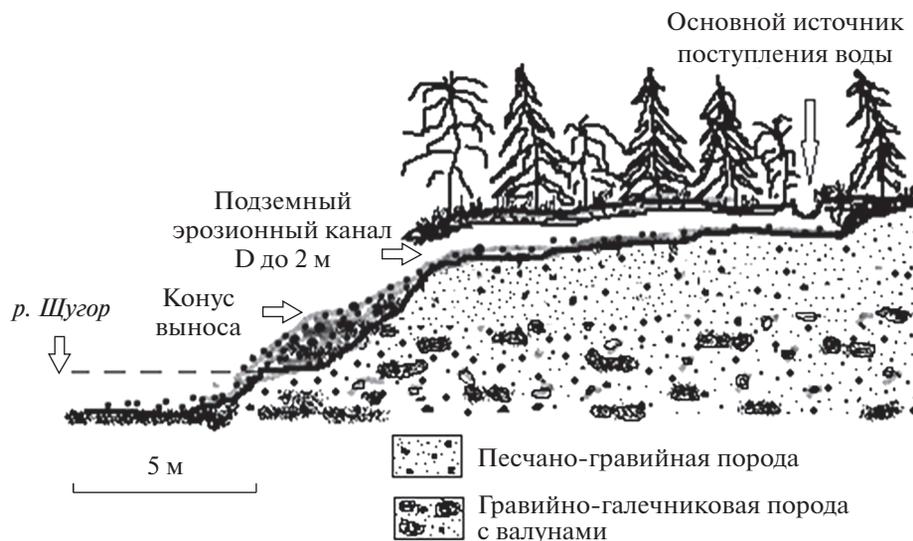


Рис. 3. Схема сформировавшегося подземного эрозионного канала в песчано-гравийной породе верхней части II надпойменной террасы р. Шугор.

ние пыльцы травянистых и кустарничковых растений – 20–35%, содержание спор колеблется в широком диапазоне от 5 до 55%. В группе пыльцы древесных растений преобладает пыльца древовидной (38%) и карликовой (20%) березы; пыльца ольховника составляет 13%, ольхи – 10%, сосны – 9%, ивы от 2 до 10%, ели – от 5 до 19% [20]. Для данных районов характерны подзолистые почвы, которые формируются в условиях преобладания осадков над испарением и, как следствие, промывной тип водного режима, обеднение растительного слоя зольными компонентами, низкотемпературный режим, медленное разложение микрофлорой органики и формирование слабо разлагающейся подстилки [19].

ПРОЯВЛЕНИЯ ФИТОГЕННОГО ПСЕВДОКАРСТА И МЕХАНИЗМ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Встреченные выходы подземных эрозионных каналов, приурочены к прибрежковым частям левобережной речной террасы р. Шугор. Это, так называемый, придолинный тип псевдокарста, который впервые был выделен и описан для лесовых массивов пораженных подземной эрозией Н.И. Кригером в 1975 г. [9, 10]. Согласно В.П. Хоменко (2003) такой процесс называется “присклоновым фильтрационным разрушением горных пород на склоне (в прибрежковой части уступов шириной до нескольких десятков и даже сотен метров) может происходить в условно плавной (медленной) и резкой (стремительной) форме [25].

Для плавной (медленной) формы процесса характерен длительный период времени, в течение которого частичное фильтрационное разрушение сменяется полным фильтрационным разрушением горных пород, а основным морфологическим признаком является ниша, сформировавшаяся в водопроницаемых породах. Если присклоновое фильтрационное разрушение продолжается, и ниша врывается внутрь склона, она может постепенно превратиться либо в “глухой подземный канал”, либо в подземный канал с выходом на поверхность в месте основного поступления воды (рис. 3) и вызвать в последующем образование провалов вдоль его оси.

Для резкой (стремительной) формы процесса, характерен короткий период времени (сутки или даже часы), когда в результате поступления большого количества воды в массив суффозионно-неустойчивых пород происходит формирование подземного канала в области поступления воды, а в зоне выноса формируется “конус выноса”. На приведенной схеме показан сформировавшийся подземный эрозионный канал в результате поступления воды в отдалении от бровки террасы, протяженностью около 15 м. Как раз такие суффозионные ниши нередко являются причиной образования оползней суффозионного генезиса или по так называемому “суффозионному механизму”, которые активно разрушают берега рек и водохранилищ, в виде циклического обваливания пород [24, 25, 29].

На исследуемом участке подземный эрозионный канал сформировался в несвязных (рыхлых) дисперсных породах, так как они перекрыты прочным или слабо размываемым экраном естественного происхождения, а ниже лежащие поро-

ды также являются экраном, так как обладают меньшими значениями коэффициента фильтрации за счет присутствия глинистых частиц (см. рис. 3). Например, как при зафиксированном суффозионно-эрозионном выносе природных несвязных дисперсных грунтов верхней части аллювиальной террасы р. Волга, где в результате подземной эрозии сформировался подземный канал под железобетонными плитами облицовки откоса берегоукрепительного сооружения [16].

Роль верхнего экрана, в данном случае, выполняет очень своеобразное природное образование, в состав которого входит лесная подстилка, верхний почвенный горизонт, пронизанный многочисленными корнями древесной, кустарничковой и травянистой растительности.

Изменение горных пород в результате воздействия агентов выветривания (атмосферных осадков, инсоляции, жизнедеятельности организмов и пр.) приводит в конечном итоге к формированию почвы. Совокупность всех абиотических и биотических факторов — составляет биогеоэкологический комплекс, где почва является связующим звеном между его компонентами. Почвы, расположенные под лесной, луговой, степной растительностью, характеризуются хорошей водопропускной способностью и структурным состоянием. Они оказывают немалое влияние на разрастание корней древесных и травянистых растений. В свою очередь, корневая система растений обладает структурообразующей способностью, так как более крупные корни и мелкие корешки, густо переплетаясь, пронизывают почву во всех направлениях [2, 22]. Корни, распределяясь в почве, движутся между крупными и мелкими агрегатами, проникают в трещины, норы и подземные ходы животных, продвигаются по следам сгнивших корней и корневищ растений. Мелкие корни и корневые волоски способны внедриться и в нерасчлененную часть почвы или подпочвы [14].

Чем больше в почве корней и корневых остатков, тем выше их структурообразующая способность, что коррелирует с объемом надземной растительной массы [2]. И.Б. Ревут [21] подчеркивает значение однолетних и многолетних растений в расчленении почвы и улучшении ее структуры. По данным Г.Н. Лысака [17], почвенные структурные агрегаты, образованные под многолетними травами, не разрушаются довольно продолжительное время. В итоге повышается противозерозионная устойчивость почвы. Апикальное нарастание корневых окончаний способствует быстрому освоению почвенного пространства, при этом обходя поверхность надземной части растений значительно уступает корневой. Ветвление и нарастание корней обеспечивает доступ растений к питательным веществам, что приводит к необходимости удерживать почвенные агрегаты, насы-

щенные минеральными веществами и влагой, в непосредственной близости от зоны поглощения (зона корневых волосков). Достигается это при помощи слизи, выделяемой кончиком корня в области корневого чехлика. Слизь способствует и продвижению корня в субстрате, и удержанию влаги, и растворению органических компонентов почвы. Кроме того, слизь смачивает почвенные агрегаты, контактирующие с корнем, скрепляя их. По мере роста корня такие обработанные почвенные комочки оказываются в зоне корневых волосков, где происходит наиболее активное всасывание питательных веществ. Слизистые выделения корня обеспечивают и прочный контакт клеточных стенок со структурными элементами субстрата [4]. Таким образом, в непосредственной близости от корня всегда сосредоточены прилипшие комочки почвы. Впоследствии, в ходе разложения корневых остатков, образуется перегной, органические вещества которого пропитывают почвенные агрегаты и склеивают их, как цемент [3]. Однако, при переработке органических веществ почвенными микроорганизмами, прочность почвенных агрегатов несколько снижается.

Формирование свежего перегноя связано с жизнедеятельностью многолетних трав, надземная часть которых, ежегодно отмирая, обеспечивает накопление гумуса, что способствует образованию почвенной структуры. В свою очередь, состав и характер почв влияют на формирование корневых систем травянистых и древесных растений. Почвенный покров национального парка Югид-ва отличается разнообразием почвообразующих пород, а систематический список почв насчитывает более 20 их подтипов. В частности, под еловыми и елово-березовыми лесами с зеленомошным покровом формируются глееподзолистые почвы [19]. Кроме того, средообразующие древесные породы первой величины (ель, береза, кедр) определяют характер растительности II и III ярусов, где широко представлены многолетние травы, полукустарнички, кустарнички и кустарники (*Rubus chamaemorus*, *Arctous alpina*, *Empetrum hermaphrodi-hermaphrodi-hermaphrodi-tum*, *Vaccinium myrtilus*, *V. uliginosum*, *Betula nana*, *Salix glauca*, *S. lanata*, *S. lapponum*). Совокупность корневых систем этих растений приводит к значительному улучшению структурного состояния почв и появлению водоустойчивых структурных агрегатов. Одной из биологических особенностей ели является эфемерность ее стержневого корня. У 2–3-летних особей он прекращает рост в длину и трансформируется в утолщение, от которого отходят горизонтальные корни. Эта связано с филогенетическим развитием елей в горных условиях, на слабозрелых почвах, так как здесь горизонтальные корни имеют решающее значение для жизнеобеспеченности деревьев. Скелетные горизонтальные корни первого порядка ветвятся до



Рис. 4. Суффозионная ниша в прибрежной части второй левобережной террасы р. Шугор (7 км ниже по течению от устья притока – р. Седью, левый берег). Неглубоко залегающие корни ели создают основу прочного почвенного слоя.

четвертого-пятого порядков с незначительным числом вертикальных ответвлений. Корневые системы древесных и многолетних травянистых растений равномерно распределяются в корнеобитаемом слое, в особенности в ее верхней части, и образуют значительные переплетения, способствующие удержанию почвы. Дернина и мочковатая корневая система многолетних трав замедляет скорость водных потоков во время дождей, разбивая их на более мелкие ручейки, что в свою очередь способствует защите почвы от смыва.

Формирование ниши происходит, как правило, в весенне-осенний период максимального увлажнения верхнего горизонта в результате сезонного промерзания и оттаивания почвенного горизонта и выпадения максимального количества осадков (рис. 4). Гранулометрический состав подпочвенного горизонта следующий: содержание фракций менее 0.002 мм до 5%, пылеватой фракции 0.05–0.002 мм – 25%, песчаной фракции 2.0–0.05 мм – 43%, гравийной 10.0–2.0 мм – 9%, галечника 10.0–200.0 мм до 13%, валунов 8%. Наличие в конусе выноса до 8% валунов и крупного галечника говорит о том, что эрозионный водный поток обладал большой кинетической энергией. Судя по состоянию почвенного слоя над подземным эрозионным каналом (псевдокарстовым ходом) в момент его фиксации (август месяц), в следующем году в весенний период максимального увлажнения произойдет его частичное разрушение в прибрежной части террасы и ее фрагментарное отступление от русла реки вглубь террасы (рис. 5).

При увеличении (см. рис. 5б) хорошо виден подземный эрозионный канал и гранулометрический состав грубообломочной фракции вынесенной водным потоком, в результате подземной эрозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении данного типа псевдокарста, где активное участие принимают такие процессы как

(а)



(б)



Рис. 5. Суффозионная ниша в прибрежной части II левобережной террасы р. Шугор (7 км ниже по течению от устья левобережного притока – р. Седью). Прочно сплетенные корни ели, березы, кедра, пихты и кустарничковых образуют верхний слабо размываемый изолирующий экран.

суффозия и подземная эрозия, нельзя не остановиться на главной особенности формирования этой необычной формы разрушения присклоновой части террасы. Этой особенностью является почвенный горизонт, переплетенный корнями древесной, кустарничковой и травянистой растительности, способный сохранять устойчивость сводов подземных эрозионных каналов, сформированных под ним за счет развития подземной эрозии. Нам кажется, что можно назвать встреченные формы “фитогенным псевдокарстом”, потому что решающую роль в формировании данного геологического феномена, помимо подземной эрозии, играют растения. При изучении подобных явлений необходим системный подход, основанный на исследовании объекта как целостной системы, со своей структурой и эмерджентными свойствами, которые возникают в результате синергетического взаимодействия ее компонентов [8]. Именно системный подход, применяя теоретические и эмпирические методы исследований, позволяет комплексно рассмотреть исследуемый объект и сделать заключение о причинах и факторах, способствующих его развитию.

В настоящее время человечество, вооруженное техникой, провоцирует деградацию естественных ландшафтов. Человек все сильнее преобразовывает верхние горизонты геологической среды, создавая для себя наиболее комфортные условия, что способствует активизации такого грозного феномена как псевдокарст. Однако, встреченное нами явление, не связано с техногенезом и формируется исключительно за счет синергетического взаимодействия абиотических и биотических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрейчук В.Н.* Введение // Проблема псевдокарста: тез. докл. совещ. / Кунгур. лаб.-стационар ГИ УрО РАН. Пермь, 1992. С. 3–6.
2. *Вершинин П.В.* Почвенная структура и условия ее формирования. М.—Л.: АН СССР, 1958. 189 с.
3. *Вильямс В.Р.* Почвоведение: Избр. сочинения: В 2-х т. 3-е изд. Т. 1, 2. М.—Л.: Гос. изд-во с.-х. лит., 1926. 323 с., 448 с.
4. *Волков О.И.* Влияние корневых выделений прорастающих семян (*Hordeum vulgare* L.) на качественный и количественный состав органических компонентов почвы // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71. № 4. С. 359–368.
5. Геологическое наследие р. Щугор // В кн. Геологическое наследие республики Коми (Россия) / Сост. П.П. Юхтанов. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2008. 350 с.
6. Геологический словарь. В 3-х томах. Изд. третье, перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 2. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
7. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Понятие “псевдокарста” и его сущность // Проблема псевдокарста: тез. докл. совещ. / Кунгур. лаб.-стационар ГИ УрО РАН. Пермь, 1992. С. 6–9.
8. *Королев В.А., Трофимов В.Т.* Инженерная геология: история, методология и номологические основы. Монография. М.: КДУ, 2016. 292 с.
9. *Кригер Н.И., Лаврусевич С.А.* Происхождение лесового псевдокарста // Докл. АН Тадж. ССР. Т. 24. № 7. 1981. С. 444–448.
10. *Кригер Н.И.* Лессовый псевдокарст // Вопросы теории и методики инженерной геодинамики. Тр. ПНИИИС, 95. вып. 32. С. 25–49.
11. *Лаврусевич А.А., Брюхань Ф.Ф., Лаврусевич И.А., Хоменко В.П.* Псевдокарстовые явления в четвертичных и коренных отложениях юго-востока Крымского полуострова // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 11. С. 15–18.
12. *Лаврусевич А.А., Крашенинников В.С., Лаврусевич И.А.* Лессовый псевдокарст и опыт укрепления лессовых массивов и откосов искусственными посадками некоторых растений (на примере лессового плато КНР, провинции Ганьсу и Шеньси) // Инженерная геология. № 1. 2012. С. 48–58.
13. *Лаврусевич А.А., Лаврусевич И.А., Алешина Т.С., Аллабергернова Э.М., Кузнецова О.Г.* Опасность развития техногенного псевдокарста (на примере участка в юго-западной части Крымского полуострова // Геориск-2018: матер. X Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам снижения природных опасностей и рисков. М.: РУДН, С. 329–333.
14. *Лаврусевич А.А., Лаврусевич И.А.* Некоторые геоэкологические аспекты устойчивости лессовых массивов (биотические факторы формирования лессового псевдокарста) // Геоэкология. 2020. № 2. С. 28–38.
15. *Лаврусевич А.А.* Псевдокарст // В сб. Опасные для строительства геологические процессы: матер. Междунар. семинара, посв. 70-летию док. геол.-мин. наук В.П. Хоменко. М.: МИСИ—МГСУ, 2019. С. 16–21.
16. *Лаврусевич И.А., Лаврусевич А.А.* Геоэкологические аспекты развития присклоновой суффозии правого берега реки Волга // Сергеевские чтения. Вып. 18. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. М.: РУДН, 2016. С. 150–153.
17. *Лысак Г.Н.* Агротехника защищает землю. Челябинск: Южно-Урал. кн. изд-во, 1983. 89 с.
18. Объяснительная записка к Государственной геологической карте РФ мас-ба 1:20000. Изд. второе. Серия Северо-Уральская, лист Q-40-XXXV (Мичабичевник) / Сост. М.А. Шишкин, Д.Х. Зархидзе, А.А. Коптяев. СПб., 2000. 128 с.
19. *Платов Н.А., Лаврусевич А.А.* Почвоведение для строителей: Учеб. пос. М.: АСВ, 2016. 96 с.
20. *Розенбаум Г.Э.* Палеогеография низовьев долины реки Печоры с верхнечетвертичного времени // В кн.: Кайнозойский покров Большеземельской тундры. М.: Изд-во МГУ, 1963. С. 82–90.
21. *Ревут И.Б.* Физика почв. Л: Колос, 1972. 370 с.

22. Саввинов Н.И. Структура почвы и ее прочность на целине, перелог и старопахотных участках. М.: Гос. изд-во с.-х. и колхоз.-кооп. лит-ры, 1931. 46 с.
23. СП 21.13330.2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Ч. 1. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях. М.: Минрегион России, 2012. 78 с.
24. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
25. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
26. Щугор // Большая советская энциклопедия: в 30 т. / Глав. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. Т. 29. М.: Сов. энциклопедия, 1978. 639 с.
27. Halliday W.R. Pseudokarst in the 21 st century // Journal of Cave and Karst Studies. 2007. V. 69. P. 103–113.
28. Knebel W. von. Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene // Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 15 Braunschweig: Friederich: Vieweg und Sohn, 1906. 222 p.
29. Terzaghi, K., Peck R.B. Soil mechanics in engineering practice. N.–Y.: John Wiley & Sons, 1948. 566 p.

PHYTOGENIC PSEUDOKARST AND CONDITIONS OF ITS FORMATION

A. A. Lavrusevich^{a,#}, T. A. Tsutsupa^{b,##}, V. A. Saldin^{c,###}, and I. A. Lavrusevich^{a,####}

^a National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow, 129337 Russia

^b Orel State University, ul. Komsomolskaya, 95, Orel, 302026 Russia

^c Federal Research Centre, Komi Science Centre, the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 24, Syktyvkar, 167982 Russia

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

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

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

^{####}E-mail: 4914907@gmail.com

The article provides data on the underground (subsurface) erosion – a complex geological process, pseudokarst being one of its manifestations. The dynamic development of pseudokarst is most often related to technogenesis, especially in the past decades, what puts that hazardous geological process in one row with other geohazards, i.e., mudflows, avalanches, karst etc. The pseudokarst typification, which was originally suggested at the international congress in Switzerland, is represented. The terraces of the Shchugor River (the right-bank tributary of the Pechora river) provide an example of the newly set type of pseudokarst, related to abiotic and biotic (vegetation) factors. It is shown that in the natural environment of the North and Nether-Polar Urals (the territory that belongs to the boreal-continental region of Europe) a very unusual type of pseudokarst develops in the slope part of the terraces, which exerts a negative effect on the stability of the near-edge part of the terraces. The development of extended small-diameter cavities under the surface of the root layer in the near-edge part of river terraces leads to the disintegration of the massif and general disturbance of stability. Root systems of woody and perennial herbaceous plants are evenly distributed in the root layer, especially in its upper part, that form vast intertwinements that help to retain the soil. For example, the spruce tap root stops its elongation in 2–3 years and transforms into the thickening, from which the horizontal roots extend. This is due to the phylogenetic development of spruce trees in mountainous conditions, on immature soils, since here horizontal roots are crucial for the life sustaining of trees. The fibrous root system of perennial grasses is also widely developed in the root layer that slows down the speed of water streams during rain-falls and snow melting, dividing flows into smaller streamlets, that helps to protect the soil from washing out. Such root layer, up to several tens of centimeters thick, is strong enough to hold the overlap of the erosional cavities formed below. Often, a smooth subsidence of the surface is observed over the cavities. Any movement along the edge of the terrace ledge by car or on foot, over the formed pseudokarst cavities, can lead to a sudden collapse. The specific mechanism and the rate of development of “phytogenic” pseudokarst with the lack of understanding of its formation conditions, can lead to the development of a landslide process or contribute to the landslide destruction of the terrace ledge due to the successive cyclic retreat of the terrace edge in the zone of pseudokarst development.

Keywords: *underground (subsurface) erosion, piping, pseudokarst, root layer, phytogenic pseudokarst, erosion channel, Northern and Subpolar Urals, Shchugor river*

REFERENCES

1. Andreichuk, V.N. *Vvedenie* [Introduction]. *Problema psevdokarsta: tezisy doklada soveshchaniya*. [Pseudokarst problem. Abstracts of Meeting papers]. *Kungurskaya laboratoriya-statsionar GI UrO RAN*, Perm, 1992, pp. 3–6. (in Russian)
2. Vershinin, P.V. *Pochvennaya struktura i usloviya ee formirovaniya* [Soil structure and conditions of its formation]. Moscow-Leningrad, AN SSSR Publ., 1958, 189 p. (in Russian)
3. Vil'yams, V.R. *Pochvovedenie* [Soil science]. 3rd edition, vol. 1, 2. Moscow-Leningrad, Gos. izd-vo s-kh. liter., 1926, 323 p., 448 p. (in Russian)

4. Volkov, O.I. *Vliyanie kornevykh vydelenii prorstayushchikh semya (Hordeum vulgare L.) na kachestvennyi i kolichestvennyi sostav organicheskikh komponentov pochvy* [Influence of root exudates of germinating seeds (*Hordeum vulgare* L.) for the qualitative and quantitative composition of organic soil components]. *Zhurnal obshchei biologii*, 2010, vol. 71, no. 4, pp. 359–368. (in Russian)
5. *Geologicheskoe nasledie r. Shchugor* [Geological heritage of the Shchugor River]. *Geologicheskoe nasledie respubliky Komi (Rossia)* [Geological heritage of the Komi Republic (Russia)]. Syktyvkar, Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 350 p. (in Russian)
6. *Geologicheskii slovar'* [Geological dictionary]. Petrov, O.V., Editor-in-chief, vol. 2. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2011, 480 p. (in Russian)
7. Dublyanskaya, G.N., Dublyanskii, V.N. *Ponyatie "pseudokarst" i ego sushchnost'* [The concept of "pseudokarst" and its essence]. *Problema pseudokarsta: tezisy doklada soveshchaniya* [Pseudokarst problem. Abstracts of Meeting papers] *Kungurskaya laboratoriya-statsionar GI UrO RAN*, Perm, 1992, pp. 6–9. (in Russian)
8. Korolev, V.A., Trofimov, V.T. *Inzhenernaya geologiya: istoriya, metodologiya i nomologicheskie osnovy* [Engineering Geology: history, methodology, and nomological foundations]. Moscow, KDU Publ., 2016, 292 p. (in Russian)
9. Kriger, N.I. *Lessovyi pseudokarst* [Loess pseudokarst]. *Voprosy teorii i metodiki inzhenernoi geodinamiki* [Issues of the theory and methodology of engineering geodynamics]. *Trudy PNIIS*, 1975, no. 32, pp. 25. (in Russian)
10. Kriger, N.I., Lavrusevich, S.A. *Proiskhozhdenie lessovogo pseudokarsta* [The origin of loess pseudokarst]. *Dokl. AN Tadzh. SSR*, 1981, vol. 24, no. 7, pp. 444–448. (in Russian)
11. Lavrusevich, A.A., Bryukhan', F.F., Lavrusevich, I.A., Khomenko, V.P. *Pseudokarstovye yavleniya v chetvertichnykh i korennykh otlozheniyakh yugo-vostoka Krymskogo poluostrova* [Pseudokarst phenomena in Quaternary and bedrock deposits of the southeast of the Crimean Peninsula]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014, no. 11, pp. 15–18. (in Russian)
12. Lavrusevich, A.A., Krasheninnikov, V.S., Lavrusevich, I.A. *Lyossovyy pseudokarst i opyt ukrepleniya lyossovyykh massivov i otkosov iskusstvennymi posadkami nekotorykh rastenii (na primere lessovogo plato KNR, provintsii Gan'su i Shen'si)* [Loess pseudokarst and the experience in stabilizing loess massifs and slopes with artificial plantings (by the example of the loess plateau in the provinces of Gansu and Shanxi, China)]. *Inzhenernaya geologiya*, 2012, no. 1, pp. 48–58. (in Russian)
13. Lavrusevich, A.A., Lavrusevich, I.A., Aleshina, T.S., Allabergenova, E.M., Kuznetsova, O.G. *Opasnost' razvitiya tekhnogenogo pseudokarsta (na primere uchastka v yugo-zapadnoi chasti Krymskogo poluostrova)* [The danger of the development of technogenic pseudokarst (by the example of a site in the southwestern part of the Crimean Peninsula)]. *Georisk-2018 Conference*, Moscow, RUDN Publ., pp. 329–333. (in Russian)
14. Lavrusevich, A.A., Lavrusevich, I.A. *Nekotorye geoekologicheskie aspekty ustoychivosti lessovyykh massivov (bioticheskie faktory formirovaniya lessovogo pseudokarsta)* [Some geocological aspects of loess massifs stability (biotic factors of loess pseudokarst formation)]. *Geoekologiya*, 2020, no. 2, pp. 28–38. (in Russian)
15. Lavrusevich, A.A. *Pseudokarst* [Pseudokarst]. *Opasnye dlya stroitel'stva geologicheskie protsessy* [Geological processes hazardous for construction]. 2019, pp. 16–21. (in Russian)
16. Lavrusevich, I.A., Lavrusevich, A.A. *Geoekologicheskie aspekty razvitiya prisklonovoi suffozii pravogo berega reki Volga* [Geocological aspects of the development of the slope suffusion of the right bank of the Volga River]. *Sergeevskie chteniya*, 2016, pp. 150–153. (in Russian)
17. Lysak, G.N. *Agrotekhnika zashchishchaet zemlyu* [Agricultural technology protects the land]. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izd-vo, 1983, 89 p. (in Russian)
18. *Obyasnitel'naya zapiska k Gosudarstvennoi geologicheskoi karte RF mas-ba 1:20000* [Explanatory note to the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 20000]. *Izдание vtoroe. Seriya Severo-Ural'skaya, list Q-40-XXXV*. Sost. M.A. Shishkin, D.Kh. Zarkhidze, A.A. Koptyaev. St. Petersburg, 2000, 128 p. (in Russian)
19. Platov, N.A., Lavrusevich, A.A. *Pochvovedenie dlya stroitelei* [Soil Science for Builders]. Moscow, ASV Publ., 2016, 96 p. (in Russian)
20. Rozenbaum, G.E. *Paleogeografiya nizov'ev doliny reki Pechory s verkhnechetvertichnogo vremeni* [Paleogeography of the lower reaches of the Pechora River valley from the Upper Quaternary]. *Kainozoiskii pokrov Bol'shezemel'skoi tundry* [Cenozoic cover of the Bol'shezemel'skaya tundra]. Moscow, MGU Publ., 1963, pp. 82–90. (in Russian)
21. Revut, I.B. *Fizika pochv* [Soil physics]. St. Petersburg, Kolos, 1972, 370 p. (in Russian)
22. Savvinov, N.I. *Struktura pochvy i ee prochnost' na tseline, pereloge i staropakhotnykh uchastkakh* [The structure of the soil and its strength on virgin soil, fallow and old arable areas]. Moscow, Gos. izd-vo s-kh i kolkh-koop. Liter., 1931, 46 p. (in Russian)
23. SP 21.13330.2012. *Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvaemykh territoriyakh i prosadochnykh gruntakh. Chast' 1. Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvaemykh territoriyakh* [Code of Rules 21.13330.2012. Buildings and structures in undermined areas and subsiding soils. Part 1. Buildings and structures in undermined territories]. Moscow, Minregion Rossii, 2012, 78 p. (in Russian)
24. Tikhvinskii, I.O. *Otsenka i prognoz ustoychivosti opolznevyykh sklonov* [Assessment and forecast of the stability of landslide slopes]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 144 p. (in Russian)
25. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffusion]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
26. *Shchugor* [Shchugor]. *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya* [Great Soviet Encyclopedia]. 3rd edition, vol. 29, Moscow, Sov. Encyclopedia, 1978, 639 p. (in Russian)
27. Halliday, W.R. *Pseudokarst in the 21 st century*. *Journal of Cave and Karst Studies*. 2007, V. 69, pp. 103–113.
28. Knebel, W. von. *Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene. Die Wissenschaft. Sammlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Monographien. Heft 15 Braunschweig: Friederich: Vieweg und Sohn, 1906, 222 p.*
29. Terzaghi, K., Peck R.B. *Soil mechanics in engineering practice*. N.–Y.: John Wiley & Sons, 1948, 566 p.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.4.02

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ОБРАЩЕНИЯ С ТКО

© 2021 г. И. В. Козлякова^{1,*}, И. А. Кожевникова¹, О. Н. Еремина^{1,**}, Н. Г. Анисимова¹

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

*E-mail: kozlyakova@rambler.ru

**E-mail: o_eremina@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020 г.

После доработки 05.11.2020 г.

Принята к публикации 18.11.2020 г.

Оптимальное размещение площадок временного складирования, переработки и захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО), при котором создаваемые объекты не становятся новым источником техногенного загрязнения окружающей среды, требует проведения предварительного инженерно-геологического районирования территорий. Такое районирование должно быть основано на всестороннем анализе геологической среды и оценке степени ее защищенности от загрязнения. В статье изложены методологические принципы типизации геологической среды и предложены критерии районирования территорий по степени благоприятности инженерно-геологических условий для размещения объектов обращения с ТКО. В основу схемы районирования положено наличие в геологическом разрезе слабопроницаемых пород и условия их залегания. На примере Центрального Федерального округа РФ определены основные типы геолого-гидрогеологического строения и составлена Карта инженерно-геологического районирования ЦФО по условиям размещения предприятий и полигонов ТКО в масштабе 1:2500000. Сделано заключение, что в подавляющей части территории округа сооружение объектов обращения с отходами требует дополнительных мер по защите геологической среды от загрязнения.

Ключевые слова: *твердые коммунальные отходы, инженерно-геологические условия, типизация геологической среды, инженерно-геологическое районирование, защищенность геологической среды, Центральный Федеральный округ РФ, объекты обращения с отходами*

DOI: 10.31857/S0869780921010045

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обращения с отходами – одна из крупных экологических проблем современности. О том, как ее надо решать, много говорится в настоящее время [6, 10, 11, 14, 15]. Один из наиболее спорных аспектов – выбор мест захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО) или размещения предприятий их утилизации. К исследованиям, направленным на обеспечение безопасного обращения с бытовыми и промышленными отходами привлечено внимание специалистов разных стран мира [20, 29, 30, 32]. Сложность проблемы обусловлена, прежде всего, ее мультидисциплинарным характером, включающим большое число социально-экономических, технологических и экологических аспектов. Существует большое количество исследований, показывающих необходимость проведения многокритериального анализа при выборе мест для размещения отходов. В последние годы во многих странах мира решение вопроса о выборе мест раз-

мещения объектов обращения с отходами базируется на мультикритериальном подходе с использованием ГИС-технологий. Такой подход хорошо зарекомендовал себя, доказав свою высокую эффективность в нахождении разумного решения [19, 23–28, 31].

Инженерно-геологические условия – один из критериев, который на практике учитывается в самую последнюю очередь. В приоритете стоит удаленность от населенных пунктов, поверхностных водоемов, особо охраняемых природных территорий. Деградация геологической среды, безусловно, происходит значительно медленнее, чем изменения поверхностных объектов. В то же время геологическая среда (горные породы и подземные воды) способны накапливать вредные компоненты в течение длительного времени, создавая тем самым предпосылки экологической катастрофы для будущих поколений. Недооценивая сейчас опасность изменения геологической среды при размещении отходов, мы создаем угрозу экологической безопасности будущего.

Цель настоящего исследования – разработка методологии оценки естественной защищенности геологической среды от загрязнения в рамках крупных экологических проектов по размещению предприятий утилизации ТКО. Работа выполнена на примере Центральной России.

Основным способом утилизации ТКО в России до сих пор остается их захоронение на полигонах. Действующая система обращения с отходами не справляется с объемами их производства. Проблема обращения с отходами наиболее остро стоит в Центральном Федеральном округе (ЦФО), который занимает площадь более 650 тыс. км² и включает 18 областей. Это один из наиболее густонаселенных и индустриально развитых регионов России. В настоящее время на территории округа скопилось свыше 90 млрд т отходов. Существует более 1000 объектов размещения отходов – полигонов и свалок, причем основная их часть не включена в государственный реестр^{1,2,3}.

Один из путей решения проблемы отходов в Центральной России – создание ограниченного числа крупных производственных комбинатов, включающих мусоросжигательный завод, предприятие по переработке отходов и полигон для захоронения [8, 18]. Такие комплексы существуют сейчас во многих развитых странах мира. Выбор участков для их размещения должен осуществляться на основании существующих санитарных правил, которые устанавливают ограничения и запреты на территории размещения полигонов в зависимости от удаленности от населенных пунктов и водных объектов, особенностей рельефа и геолого-гидрогеологических условий [21, 22, 27, 33].

Что касается геолого-гидрогеологических условий, перспективными для размещения полигонов являются территории, где в верхней части разреза залегают слабопроницаемые глинистые породы, а грунтовые воды находятся на глубине более 2 м. Наличие мощных глинистых толщ в верхней части разреза – это основное условие при оценке благоприятности территории для размещения предприятий утилизации отходов, так как они препятствуют поступлению загрязнения с поверхности в нижележащие водоносные горизонты. Как показывает опыт, нарушение этого

требования может привести к серьезным негативным экологическим последствиям [4, 5, 16].

Для территории ЦФО РФ был выполнен анализ условий естественной защищенности геологической среды от загрязнения, определены основные типы геолого-гидрогеологического строения, предложены критерии оценки степени благоприятности территорий для реализации комплексных проектов в сфере обращения с отходами.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ И ПРЕДПРИЯТИЙ УТИЛИЗАЦИИ ТКО

Инженерно-геологическая оценка территории для выбора участков размещения отходов основывается на том положении, что существование в геологическом разрезе природных барьеров, препятствующих поступлению загрязнения с поверхности в грунтовые толщи и подземные воды, значительно упрощает задачу сохранения благоприятной экологической обстановки в районах полигонов и предприятий утилизации ТКО. Глинистые толщи представляют собой такие природные барьеры. При инженерно-геологических исследованиях наличие мощных глинистых толщ в верхней части разреза – это основное условие оценки благоприятности территории для размещения предприятий утилизации отходов [2].

Основные позиции методологии оценки территории Центральной России приведены на рис. 1.

В геолого-структурном отношении ЦФО находится в пределах Русской платформы, где в верхней части геологического разреза залегают разновозрастные стратиграфо-литологические комплексы осадочных пород [1, 7, 13].

Все многообразие этих комплексов на глубину порядка 50–60 м было разделено на несколько типов в зависимости от литологии, возраста и степени обводненности дочетвертичных и четвертичных пород.

В формате MapInfo были созданы два вспомогательных информационных слоя, на одном из которых показаны комплексы дочетвертичных пород различной проницаемости и обводненности, на другом – комплексы четвертичных пород. Формальное наложение этих слоев позволило выделить различные сочетания, для каждого из которых был составлен типовой геологический разрез, где выделены слои различного возраста, литологического состава и проницаемости. Материалом для составления информационных слоев и разрезов послужили мелкомасштабные архивные геологические карты Центральной России и литературные источники. В этих работах

¹ Постановление Правительства РФ от 16.03.2016 № 197 “Об утверждении требований к составу и содержанию территориальных схем обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами”. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201603180009>.

² Территориальная схема обращения с отходами Московской области, в том числе с твердыми коммунальными отходами, утвержденная Постановлением Правительства Московской области 22.12.16 г., № 984/47. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456034634>.

³ Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ “Об отходах производства и потребления”. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi>.

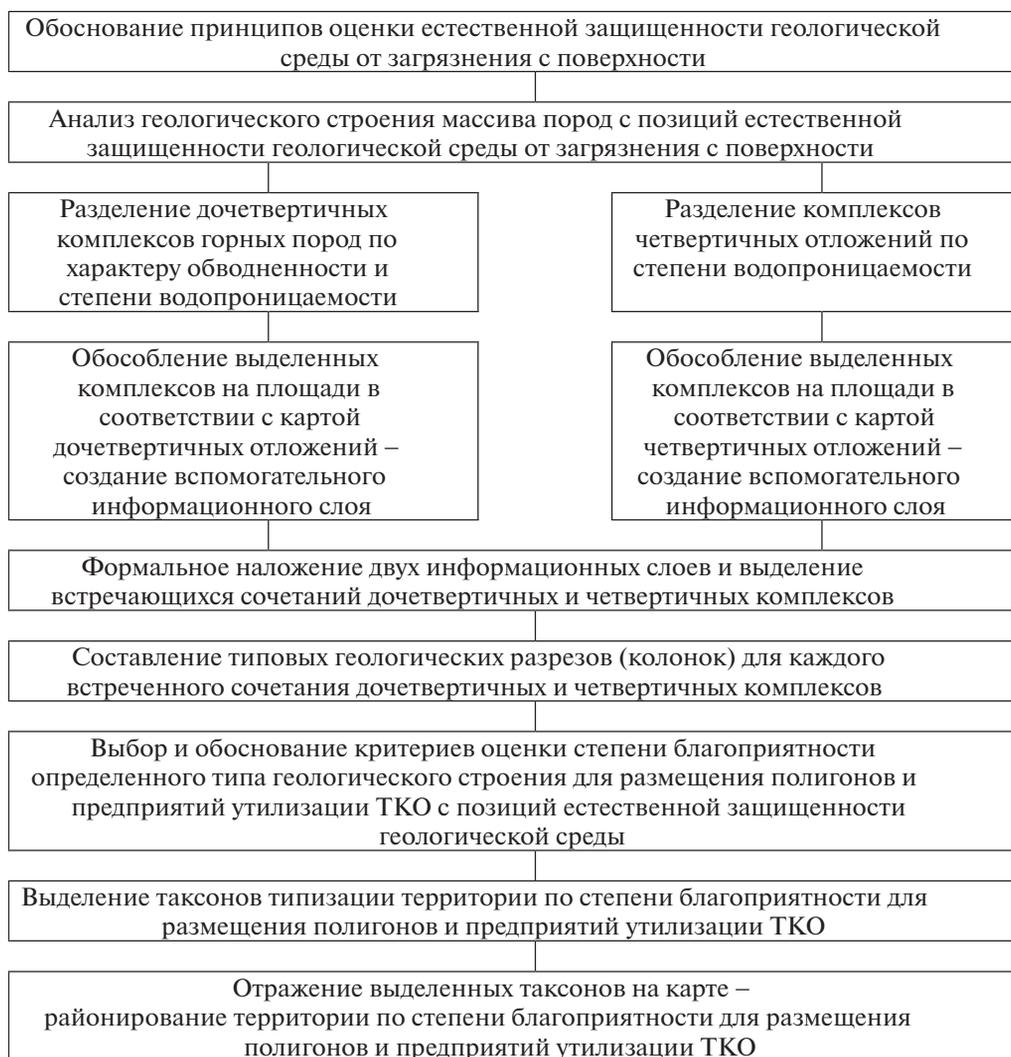


Рис. 1. Концептуальная модель инженерно-геологической оценки территории Центральной России для размещения полигонов и предприятий утилизации ТКО.

использованы карты ГИС – Атласа “Недра России” составленного ВСЕГЕИ и Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 [3, 12].

Каждый тип геологического строения (типовой геологический разрез) был отнесен к определенной категории благоприятности территории (таксону) в зависимости от наличия слабопроницаемых слоев четвертичного и дочетвертичного возраста и глубины их залегания.

Выделено 5 таксонов, охарактеризованные как благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные, неблагоприятные и весьма неблагоприятные с позиций реализации проектов, связанных с утилизацией ТКО. Оценка проводилась на основании изучения геологического строения и в зависимости от условий залегания слабопроницаемых отложений в верхней части разреза.

На итоговой карте районирования показаны контуры и индексы всех типов геологического строения, а цветом (по принципу светофора) выделены районы различных категорий благоприятности. Карта – достаточно информативный документ, позволяющий увидеть не только оценочные категории, но и обобщенную геологическую характеристику каждого таксона.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Оценка естественной защищенности геологической среды от загрязнения, поступающего с поверхности, проводилась в зависимости от наличия в разрезе дочетвертичных и четвертичных отложений комплексов пород пониженной проницаемости, способных защитить геологическую

Таблица 1. Типы грунтовых толщ на карте инженерно-геологического районирования ЦФО

Дочетвертичные отложения	Четвертичные отложения			
	Пески, моренные суглинки, переслаивание песков и суглинков	Пески	Моренные суглинки, переслаивание песков и суглинков	Лессовидные суглинки и супеси
	1	2	3	4
Преимущественно пески и песчаники (К, Р, N) водоносные I	I-1	I-2	I-3	I-4
Мергели, мел (К) слабоводоносные и неравномерно обводненные II	II-1	II-2	II-3	II-4
Преимущественно глины (J) водоупорные III	III-1	III-2	III-3	
Аргиллиты, алевролиты, песчаники местами загипсованные, гипс (Р-Т) слабоводоносные и неравномерно обводненные IV	IV-1	IV-2	IV-3	
Известняки, доломиты с прослоями глин (D-C) водоносные V	V-1	V-2	V-3	V-4

среду от загрязнения, поступающего с поверхности.

Среди дочетвертичных отложений выделены:

- слабопроницаемые глинистые толщи юрского возраста;

- неравномерно проницаемые мел и мергели мелового возраста, алевролиты-аргиллитовые загипсованные породы и гипсы пермского и триасового возраста;

- хорошо проницаемые пески и песчаники неогенового, палеогенового и мелового возраста и терригенно-карбонатные породы девона и карбона.

Пространственное расположение этих комплексов отражено на первом вспомогательном информационном слое, созданном в формате MapInfo.

При анализе четвертичных толщ учитывалось наличие и положение в разрезе слабопроницаемых суглинков различных генетических типов [8, 9, 17]. Основной слабопроницаемый комплекс пород среди четвертичных отложений – моренные суглинки. На втором вспомогательном информационном слое выделены территории, где эти суглинки залегают с поверхности под аллювиальными и водно-ледниковыми песками. Вы-

делены также территории, где слабопроницаемые покровные суглинки и супеси имеют значительное распространение и мощность.

В результате наложения двух вспомогательных информационных слоев выявлено 18 типов грунтовых толщ в зависимости от стратиграфо-литологических особенностей и обводненности комплексов дочетвертичных и четвертичных отложений, которые стали основой для результирующего оценочного районирования территории по степени благоприятности для размещения предприятий и полигонов утилизации ТКО (табл. 1).

Для каждого из этих типов составлен обобщенный (типовой) геологический разрез (рис. 2), который иллюстрирует, как залегают породы выделенных комплексов, различающиеся по своей проницаемости. Выделяются водоносные и хорошо проницаемые породы, слабоводоносные и неравномерно обводненные породы, водоупорные или слабопроницаемые породы. На разрезах обводненность и проницаемость показаны цветом, стратиграфо-литологическая характеристика – крапом и штриховкой.

Итогом проведенных исследований стала типизация территории Центральной России по благоприятности для размещения объектов утилиза-

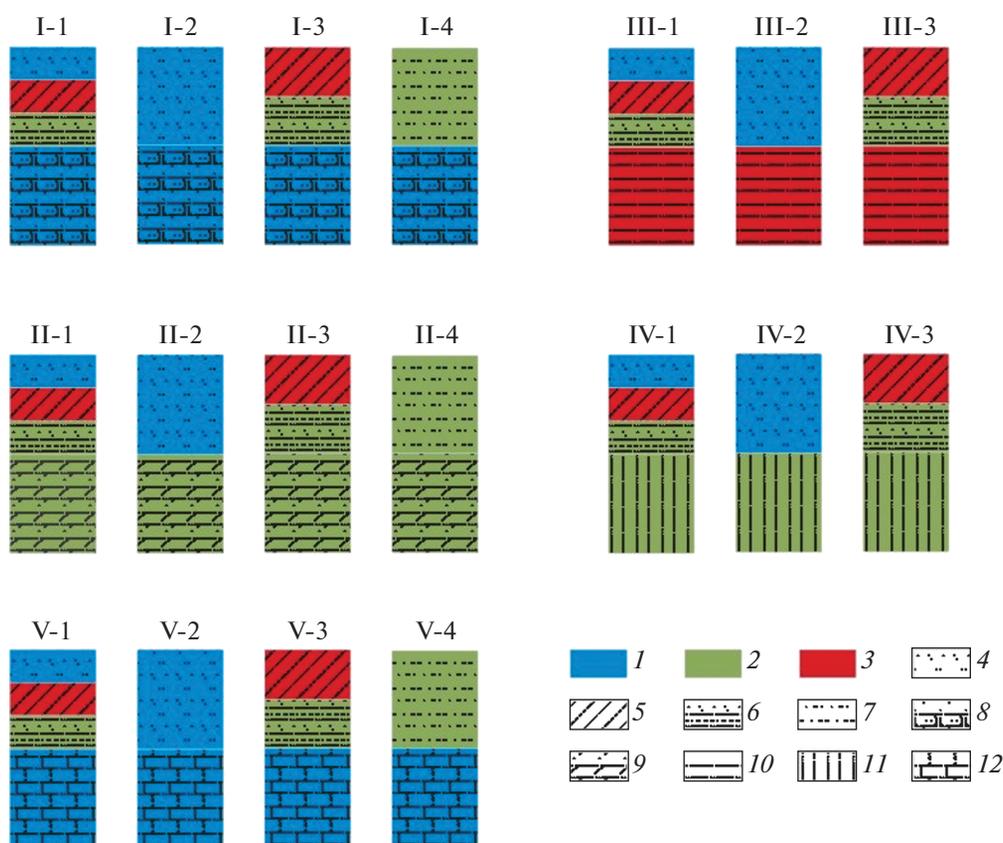


Рис. 2. Типовые геологические разрезы к карте инженерно-геологического районирования. Условные обозначения: 1 – водоносные и хорошо проницаемые породы, 2 – слабодоносные и неравномерно обводненные породы, 3 – водоупорные породы. Четвертичные отложения: 4 – пески, 5 – моренные суглинки, 6 – переслаивание песков и суглинков, 7 – лессовидные суглинки и супеси. Дочетвертичные отложения: 8 – преимущественно пески и песчаники (К, Pg, N), 9 – мергели, мел (К), 10 – преимущественно глины (J), 11 – аргиллиты, алевролиты, песчаники местами загипсованные, гипс (P–T), 12 – известняки, доломиты с прослоями глин (D–C).

ции ТКО (табл. 2). На ее основе составлена в масштабе 1 : 2500000 обзорная карта инженерно-геологического районирования (рис. 3).

Благоприятными признаны массивы грунтов, в которых выделяются две водоупорные толщи – четвертичные моренные суглинки, залегающие у поверхности, и юрские глины. Таким образом, четвертичный и мезозойский водоносные комплексы оказываются изолированными друг от друга, а геологическая среда защищена от загрязнений, поступающих с поверхности. Эти районы выделены локально, преимущественно в северной части территории.

Условно благоприятными признаны территории, где с поверхности залегают моренные четвертичные суглинки, подстилаемые хорошо проницаемыми отложениями. На этих участках степень защищенности геологической среды от поверхностных загрязнений определяется мощностью моренных грунтов. Такие территории выделены на северо-западе территории и на водораздельных поверхностях в ее центре.

Условно неблагоприятными являются территории, где грунтовые толщи сложены песчано-глинистыми четвертичными отложениями без регионально выдержанных слабопроницаемых прослоев, подстилаемыми юрскими глинами. Здесь грунтовый водоносный горизонт подвержен загрязнению, а степень защищенности глубоких горизонтов определяется мощностью и глубиной залегания юрских глин. Такие районы отмечены в северной и восточной частях ЦФО.

Неблагоприятными признаны участки, где массив сложен хорошо проницаемыми четвертичными и дочетвертичными породами с локальным распространением слабопроницаемых слоев. Геологическая среда практически не защищена от загрязнений. К таким участкам относится большая часть территории на юго-западе и востоке ЦФО, с отдельными участками на севере.

Весьма неблагоприятными являются территории, где в геологическом строении отмечаются только хорошо проницаемые и водоносные отложения. Геологическая среда здесь не защищена от

Таблица 2. Типизация территории ЦФО по степени благоприятности для размещения полигонов и предприятий утилизации твердых коммунальных отходов в зависимости от инженерно-геологических условий

Степень благоприятности инженерно-геологических условий. Тип геологического строения	Особенности инженерно-геологических условий
Благоприятные III-3	В разрезе выделяются две водоупорные толщи пород: четвертичные моренные суглинки, залегающие с поверхности, и юрские глины, разделяющие четвертичный и мезозойский водоносные комплексы. Геологическая среда защищена от загрязнения, поступающего с поверхности.
Условно благоприятные I-3, II-3, IV-3, V-3	С поверхности залегают водоупорные четвертичные моренные суглинки, которые подстилаются хорошо проницаемыми и водоносными или слабо-водоносными и неравномерно обводненными четвертичными и дочетвертичными отложениями. Защищенность геологической среды от загрязнения определяется мощностью слоя морены.
Условно неблагоприятные III-1, III-2	Четвертичные отложения представлены песчано-глинистыми водоносными и слабо-водоносными неравномерно обводненными породами. Грунтовый водоносный горизонт не защищен от загрязнения. Четвертичная толща подстилается юрскими водоупорными глинами. Мезозойский водоносный комплекс защищен от загрязнения. Защищенность геологической среды определяется глубиной залегания и мощностью слоя юрских глин.
Неблагоприятные I-1, I-4, II-1, II-2, II-4, IV-1, IV-2, V-1, V-4	В разрезе выделяются хорошо проницаемые, водоносные, слабо-водоносные и неравномерно обводненные комплексы четвертичных и дочетвертичных пород. Можно выделить локальные участки распространения слабопроницаемых пород, невыдержанных по мощности и глубине залегания. Геологическая среда практически не защищена или слабо защищена от загрязнения.
Весьма неблагоприятные I-2, V-2	Четвертичные и подстилающие их дочетвертичные отложения представлены хорошо проницаемыми и водоносными комплексами пород. Геологическая среда не защищена от загрязнения, поступающего с поверхности.

поступающих с поверхности загрязнений. 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.

ПРИМЕНЕНИЕ КАРТЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА УЧАСТКОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ТКО

В данном исследовании на примере Центральной России мы попытались показать, что геологические условия, как один из критериев при выборе участков для размещения ТКО, требуют отдельного специального анализа, так как обладают высокой пространственной изменчивостью. При их характеристике недостаточно просто отметить какие грунты залегают с поверхности в той или иной части территории и на какой глубине находятся грунтовые воды, как это делается обычно

при проведении районирования для выбора мест размещения отходов^{4,5}.

Оценочная типизация территории в зависимости от наличия в разрезе одного или нескольких слабопроницаемых слоев, залегающих относительно близко к поверхности и выделение таксонов по степени защищенности геологической среды или другими словами – благоприятности для размещения ТКО, позволяют учесть в общей оценке территории степень опасности загрязнения массива грунтов и подземных вод.

Карта инженерно-геологического районирования, составленная на основе разработанной ти-

⁴ Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. Утверждена Министерством строительства Российской Федерации 2 ноября 1996 г. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006959>

⁵ СанПиН 2.1.7.1038-01 Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов. Министерство здравоохранения Российской Федерации. 2001. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901789953>

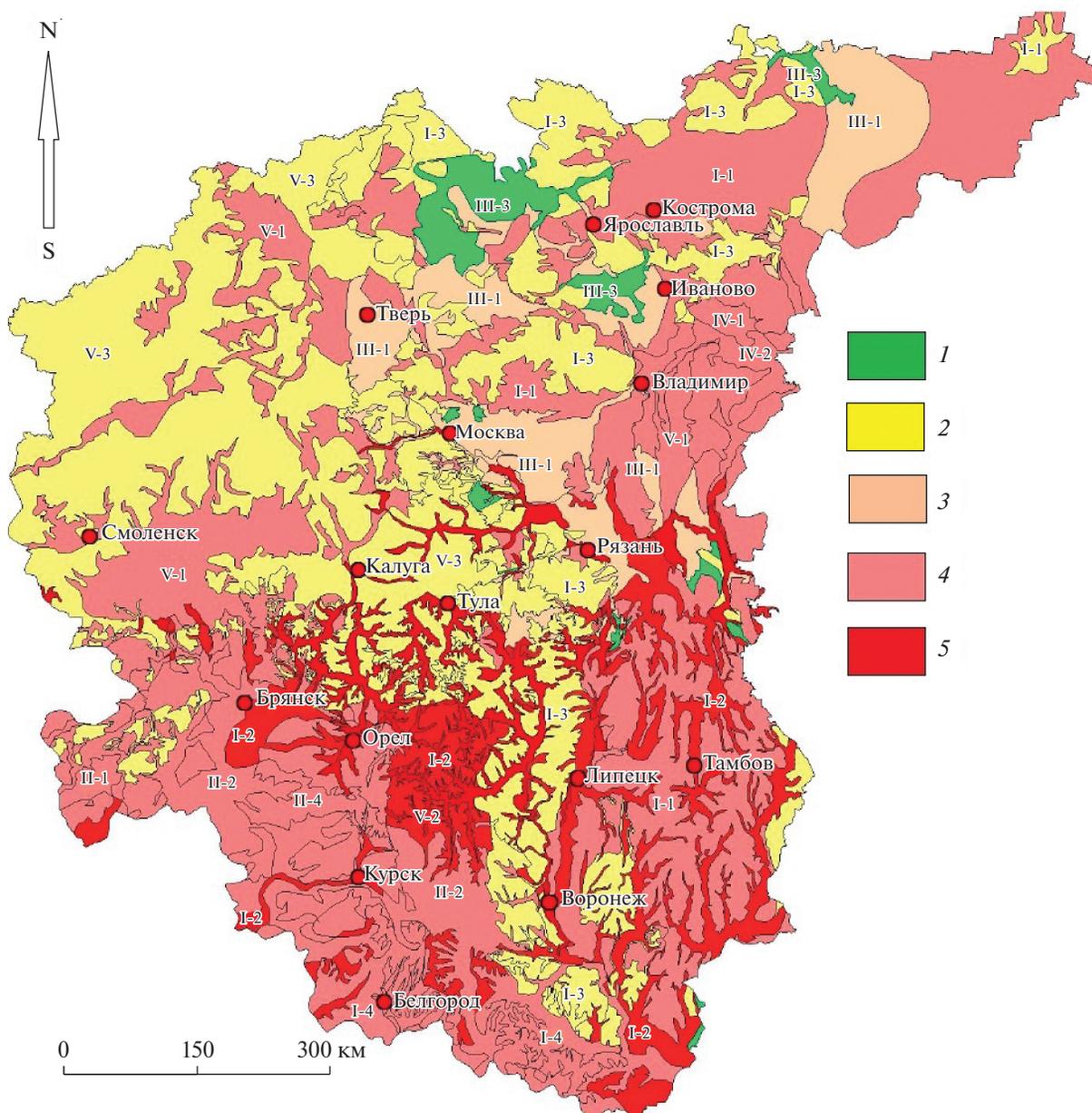


Рис. 3. Карта инженерно-геологического районирования ЦФО по условиям размещения предприятий и полигонов ТКО. Районы с различной степенью благоприятности инженерно-геологических условий: 1 – благоприятные, 2 – условно благоприятные, 3 – условно неблагоприятные, 4 – неблагоприятные, 5 – весьма неблагоприятные. Подробная характеристика районов в табл. 2.

пизации территории, дает общее представление о благоприятности планируемых мест размещения предприятий утилизации отходов на территории округа. Она составлена в цифровом формате и должна рассматриваться как информационный слой, который может быть интегрирован в общую ГИС, создаваемую по многокритериальному принципу с целью принятия решений по выбору мест размещения отходов. Таксонам типизации по степени благоприятности несложно дать балльную оценку, если требуется перейти к коли-

чественным методам многокритериального анализа.

Кроме того, карта районирования имеет значение и как самостоятельный документ, позволяющий оценить современное состояние проблемы обращения с отходами на территории Центральной России. Анализ карты показывает, что территории Курской и Белгородской областей полностью относятся к весьма неблагоприятной и неблагоприятной категории. То есть в пределах этих областей практически невозможно выделить

крупные участки, где грунтовые толщи характеризуются природными защитными свойствами, препятствующими поступлению загрязнения с поверхности. Для Брянской, Калужской, Орловской, Липецкой, Тамбовской, Воронежской, Рязанской, Владимирской и Костромской областей неблагоприятные и весьма неблагоприятные районы занимают более половины площади области.

Таким образом, в подавляющей части территории округа сооружение объектов обращения с отходами требует проведения дополнительных мероприятий по защите геологической среды от загрязнения. В настоящее же время многие полигоны и свалки на территории ЦФО размещены без какого-либо учета геологических условий и существует высокий риск загрязнения геологической среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований можно выделить основные позиции методологии оценки естественной защищенности геологической среды от загрязнения в рамках крупных экологических проектов по размещению предприятий утилизации ТКО:

– оценка благоприятности территории при выборе мест для размещения предприятий утилизации и полигонов захоронения ТКО должна обязательно учитывать степень естественной защищенности геологической среды от загрязнения;

– степень естественной защищенности геологической среды оценивается на основании наличия в геологическом разрезе одного или нескольких слабопроницаемых комплексов пород, препятствующих поступлению в подземные водоносные горизонты загрязнения с поверхности, мощности и глубины залегания этих комплексов;

– универсальным методом оценки естественной защищенности геологической среды больших по площади территорий служит инженерно-геологическое районирование, которое включает типизацию территорий по особенностям геолого-гидрогеологического строения, оценку благоприятности каждого выделенного типа и зонирование территории по степени благоприятности по геологическим критериям для размещения предприятий и полигонов утилизации ТКО.

В заключение необходимо отметить, что мелкомасштабные карты или схемы оценочного инженерно-геологического районирования способны дать общее представление о благоприятности планируемых мест размещения комплексов обращения с отходами. Они позволяют выделить возможные ключевые участки для дальнейших изысканий и дать общее представление об объемах необходимых дополнительных мероприятий по

защите геологической среды от загрязнений при строительстве и эксплуатации таких технических систем. Они должны использоваться на начальных этапах проектирования комплексов, связанных с утилизацией и складированием ТКО.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме НИР № гос. регистрации АААА-А19-119101890052-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология СССР. Т. 4. Центр Европейской части СССР. Геологическое описание. М.: Изд-во Недра, 1971. 742 с.
2. *Гольдберг В.М.* Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 248 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1:1000000. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999.
4. *Джамалов Р.Г., Медовар Ю.А., Юшманов И.О.* Влияние полигона твердых бытовых отходов на качество подземных и поверхностных вод (на примере Владимирской области) // *Сергеевские чтения: Вып. 20: Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.).* М.: РУДН, 2018. С. 175–178.
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. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.).* М.: РУДН, 2018. С. 65–73.
6. *Зотов В.Б.* Проблемы утилизации твердых бытовых отходов в Российской Федерации и пути их решения // *Управление государственное, муниципальное и корпоративное: теория и лучшие практики: матер. I Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. А.Н. Гуда.* 2016. С. 13–18.
7. *Инженерная геология СССР. Т. 1. Русская платформа / Под ред. И.С. Комарова.* М.: Изд-во МГУ, 1978. 527 с.
8. *Кашперюк П.И., Макеева Т.Г., Аканов А.В., Никитина К.В., Подлесных А.И.* Некоторые правовые и природоохранные вопросы формирования полигонов переработки и захоронения ТКО в Подмоскovie // *Сергеевские чтения. Вып. 20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.).* М.: РУДН, 2018. С. 71–73.
9. *Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г.* Инженерно-геологическое районирование Центрального федерального округа России по условиям размещения предприятий и полигонов твердых

- бытовых отходов // Сергеевские чтения. Вып. 20. Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М.: РУДН, 2018. С. 74–77.
10. *Осинов В.И.* Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. 2019. № 3. С. 3–11.
 11. *Осинов В.И., Мамаев Ю.А., Козлякова И.В.* Территориальное размещение полигонов твердых коммунальных отходов // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 6. С. 567–574.
 12. Пакет оперативной геологической информации (ГИС-Атлас) Центральный федеральный округ. ВСЕГЕИ. 2018. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/>
 13. Природные опасности России. Экзогенные геологические опасности / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко, М.: Изд-во “Крук”, 2002. 348 с.
 14. *Хмельченко Е.Г.* Твердые бытовые отходы и способы решения проблемы их утилизации в России // Государство, власть, управление и право: история и современность. Матер. 8-й Всерос. научно-практ. конф. 2017. С. 192–195.
 15. *Хмельченко Е.Г.* Проблемы утилизации твердых коммунальных отходов в Российской Федерации и пути их решения // Муниципальная академия. 2018. № 2. С. 110–114.
 16. *Хмельченко Е.Г., Казакова И.Г., Богомолов Ю.Г., Савельев А.Ф., Медовар Ю.А.* О влиянии полигона твердых коммунальных отходов на качество подземных вод в Московской и Владимирской областях // Муниципальная академия. 2018. № 3. С. 55–62.
 17. *Экзарьян В.Н.* Геоэкология и охрана окружающей среды. М.: Изд. “Щит-М”, 2009.
 18. *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. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). М.: РУДН, 2018. С. 97–101.
 19. *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>
 20. *Cremiato, R., Mastellone, M.L., Tagliaferri, C., Zaccariello, L., Lettieri, P.* Environmental impact of municipal solid waste management using life cycle assessment: the effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production // Renewable Energy. Elsevier. 2018. V. 124(C). P. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.033>
 21. *Deswal, M., Laura, G.S.* GIS based modeling using Analytic Hierarchy Process (AHP) for optimization of landfill site selection of Rohtak city, Haryana (India) // Journal of Applied and Natural Science. 2018. 10 (2): 633–642.
 22. *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>
 23. *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. V. 76. P. 68. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6392-4>
 24. *Guler, D., Yomralioglu, T.* Alternative suitable landfill site selection using analytic hierarchy process and geographic information systems: a case study in Istanbul // Environmental Earth Sciences. October 2017. 76: 678. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7039-1>
 25. *Khan, D, Samadder, S.R.* Municipal solid waste management using geographical information system aided methods: a mini review // Waste Manag. Res. 2014. 32:1049–1062.
 26. *Khodaparast, M., Rajabi, Ali M., Edalat, Ali.* Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran // Environmental Earth Sciences, January 2018. № 77. P. 52. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7215-3>
 27. *Kontos, T.D., Komilis, D.P., Halvadakis, C.P.* () Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology // Waste Management. 2005. № 25. P. 818–832.
 28. *Maguiri Abdelhakim El, Kissi Benaissa, Idrissi Laila, Souabi Salah.* Landfill site selection using GIS, remote sensing and multicriteria decision analysis: case of the city of Mohammedia, Morocco // Bull. Eng. Geol. Environ. 2016. № 75. P. 1301–1309. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0889-z>
 29. *Nakhaei, M., Amiri, V., Rezaei, K., Moosae, F.* An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran // Bull. Eng. Geol. Environ. 2015. № 74. P. 233–246. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0577-9>
 30. *Ogola, J.S., Chimuka, L., Tshivhase, S.* Management of Municipal Solid Wastes: A Case Study in Limpopo Province, South Africa Integrated // Waste Management. V. I. 2011. P. 91–112. Available at: www.intechopen.com
 31. *Rahmat, Z.G., Niri, M.V., Alavi, N. et al.* Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran // KSCE Journal of Civil Engineering. January 2017. V. 21. № 1. P. 111–118. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0296-9>
 32. *Yannah, M., Martens, K., Van Camp, M., Walraevens, K.* Geophysical exploration of an old dumpsite in the perspective of enhanced landfill mining in Kermt area, Belgium // Bull. Eng Geol Environ. 2019. 78: 55–67. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1169-2>
 33. *Zelenović Vasiljević, T., Srdjević, Z., Bajčetić, R. et al.* GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transitional Countries: A Case Study From Serbia // Environmental Management. February 2012. V. 49. № 2. P. 445–458. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9792-3>

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF ASSESSING GEOENVIRONMENT FOR ALLOCATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT FACILITIES

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

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

[#] *E-mail: kozlyakova@rambler.ru*

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

The adequate selection of sites for temporary storage, processing and disposal of municipal solid waste (MSW) implies that the constructed facilities do not become a new source of anthropogenic contamination of the environment. To meet this condition, it necessary to perform the preliminary engineering geological zoning of territories. This zoning should be based on the comprehensive investigation of the geological environment for assessing the degree of its protection from contamination. The paper discusses the methodological issues of geoenvironment typification and suggests the criteria for territory zoning by the degree of engineering geological conditions favorability for the allocation of municipal solid waste management facilities. The zoning scheme is based on the presence of low permeable deposits in geological structure and on their occurrence specifics. By the example of the Central Russia territory, the principal types of geological and hydrogeological structure are distinguished, and the Map of engineering geological zoning of Central Federal okrug of Russian Federation by the conditions of allocation of MSW facilities and disposal sites has been compiled to a scale 1:2500000. This map proves that for the bulk of the areas, it is necessary to undertake additional measures for geological environment protection from contamination.

Keywords: *municipal solid wastes, engineering geological conditions, methodology of typifying geoenvironment, engineering geological zoning, geoenvironment protection, Central Federal okrug, allocation of waste management facilities*

REFERENCES

1. *Geologiya SSSR. Tom 4. Tsentral'noy Evropeyskoy chasti SSSR. Geologicheskoe opisaniye* [Geology of the USSR. Volume 4. Centre of the European part of the USSR. Geological description]. Moscow, Nedra Publ., 1971, 742 p. (in Russian)
2. Gol'dberg, V.M. *Vzaimosvyaz' zagryazneniya podzemnykh vod i prirodnoy sredy* [Relationship between the contamination of groundwater and the environment]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 248 p. (in Russian)
3. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii mashtab 1:1000000* [State Geological map of the Russian Federation, scale 1:1000000]. VSEGEI. 1999 (in Russian)
4. Dzhamalov, R.G., Medovar, Yu.A., Yushmanov, I.O. *Vliyaniye poligona tverdykh bytovykh otkhodov na kachestvo podzemnykh i poverkhnostnykh vod (na primere Vladimirskoy oblasti)* [The influence of municipal solid waste disposal site on the quality of ground- and surface water (by the example of Vladimir oblast)]. *Sergeevskie chteniya*, issue 20. Proceedings of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN PUBL., 2018, pp. 175-178. (in Russian)
5. Zaikanov, V.G., Zaikanova, I.N., Buldakova, E.V. *Geoekologicheskii i landshaftno-ekologicheskii analiz syshchestvuyushchikh svalok TBO Moskovskoy oblasti* [Geoecological and landscape ecological analysis of landfill sites in Moscow oblast]. *Sergeevskie chteniya*, issue 20. Proceedings of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 65-73 (in Russian)
6. Zotov, V.B. *Problemy utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov v Rossiyskoy Federatsii i puti ikh resheniya* [Problems of utilization of solid domestic waste in the Russian Federation and ways to solve them]. In: State, Municipal and Corporate Governance: Theory and Best Practices. Materials of the first All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. A.N. Gud, Ed., 2016, pp. 13–18. (in Russian)
7. *Inzhenernaya geologiya SSSR. Tom 1. Russkaya platforma* [Engineering geology of the USSR, Vol. 1. The Russian Platform]. I.S. Komarov, Ed., Moscow, Mosk. Univ. Publ., 1978, 527 p. (in Russian)
8. Kashperuk, P.I., Makeeva, T.G., Akanov, A.V., Nikitina K.V., Podlesnykh, A.I. *Nekotorye pravovye i prirodookhrannyye voprosy formirovaniya poligonov pererabotki i zakhoroneniya TKO v Podmoskov'e* [Some legislative and nature-conservation issues in the arrangement of MSW reprocessing and disposal sites in the Moscow region]. *Sergeevskie chteniya*, issue 20. Proceedings of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 71–73 (in Russian)
9. Kozlyakova, I.V., Kozhevnikova I.A., Anisimova N.G. *Inzhenerno-geologicheskoe raionirovaniye Tsentral'nogo federal'nogo okruga Rossii po usloviyam razmeshcheniya predpriyatii i poligonov tverdykh bytovykh otkhodov* [Engineering geological zoning of the Central Federal okrug in Russia by the conditions for allocation of MSW storage sites and processing facilities]. *Sergeevskie chteniya*, issue 20. Proc. of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN PUBL., 2018, pp. 74-. (in Russian)
10. Osipov, V.I. *Upravleniye tverdymi kommunal'nymi otkhodami kak federal'nyi ekologicheskii projekt* [Management of municipal solid waste as a Federal ecological

- project]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
11. Osipov, V.I., Mamaev, Yu.A., Kozlyakova, I.V. Territorial placement of solid municipal waste landfills. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 3, pp. 338–344.
 12. *Paket operativnoi geologicheskoi informatsii* [GIS atlas of current geological information, Central Federal okrug]. VSEGEI, <http://atlaspacket.vsegei.ru> (in Russian)
 13. *Prirodnye opasnosti Rossii. Ekzogennnye geologicheskie opasnosti* [Natural hazards in Russia. Exogenous geological hazards]. V.M. Kutepov, A.I. Sheko, Eds. Kruk Publ., 2002, 348 p. (in Russian)
 14. Khmelchenko, E.G. *Tverdye bytovye otkhody i sposoby resheniya problem ikh utilizatsii v Rossii* [Solid household waste and ways to solve the problem of their utilization in Russia]. In: The state, power, management and law: history and contemporaneity. Proc. the 8th All-Russian Sci. and Practical Conf., 2017, pp. 192–195. (in Russian)
 15. Khmelchenko, E.G. *Problemy utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov v Rossiiskoi Federatsii i puti ikh resheniya* [Problems of utilization of solid municipal waste in the Russian Federation and ways to solve them]. *Munitsipal'naya akademiya*, 2018, no. 2, pp. 110–114. (in Russian)
 16. Khmelchenko, E.G., Kazakova, I.G., Bogomolov, Yu.G., Savel'ev, A.F., Medovar, Yu.A. O vliyaniy poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov na kachestvo podzemnykh vod v Moskovskoi i Vladimirskoi oblastyakh [On the influence of solid utility waste on the quality of underground water in the Moscow and Vladimir regions] *Munitsipal'naya akademiya*, 2018, no. 3, pp. 55–62. (in Russian)
 17. Ekzaryan, V.N. *Geoekologiya i okhrana okruzhayushchei sredy* [Geoecology and the environment conservation]. Moscow, Shchit-M Publ., 2009. (in Russian)
 18. Ekzaryan, V.N. *Metodologicheskie osnovy raionirovaniya territorii dlya vybora mest razmeshcheniya poligonov otkhodov* [Methodological fundamentals of zoning territories for selecting places for the waste storage sites. Sergeevskie chteniya, issue 20. Proceedings of the Sci. Conference March 22, 2018, Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 97–101. (in Russian)
 19. Yuganova, T.I. *Vybor uchastkov dlya razmeshcheniya ob'ektov obrashcheniya s otkhodami na osnove metodov mnogokriterial'nogo prinyatiya reshenii* [Selection of sites for allocation of waste disposal objects based on the multicriteria decision-making methods]. *Geoekologiya*, 2019, no.4, pp. 79–93. (in Russian)
 20. Cremiato, R., Mastellone, M.L., Tagliaferri, C., Zaccariello, L., Lettieri, P. Environmental impact of municipal solid waste management using life cycle assessment: the effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary production. *Renewable Energy*, Elsevier, 2018, vol. 124(C), pp. 180–188.
 21. Deswal, M., Laura, G.S. GIS based modeling using Analytic Hierarchy Process (AHP) for optimization of landfill site selection of Rohtak city, Haryana (India). *Journal of Applied and Natural Science*, 2018, no. 10(2), pp. 633–642.
 22. 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.
 23. 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, vol. 76, p. 68.
 24. Guler, D., Yomralioglu, T. Alternative suitable landfill site selection using analytic hierarchy process and geographic information systems: a case study in Istanbul. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, p. 678.
 25. Khan, D, Samadder, S.R. Municipal solid waste management using geographical information system aided methods: a mini review. *Waste Manag Res.*, 2014, no. 32, pp. 1049–1062.
 26. Khodaparast, Mahdi, Rajabi, Ali M., Edalat, Ali. Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 2018, no. 77, p. 52.
 27. Kontos, T.D., Komilis, D.P., Halvadakis, C.P. Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology. *Waste Management*, 2005, no. 25, pp. 818–832.
 28. Maguiri Abdelhakim El, Kissi Benaissa, Idrissi Laila, Souabi Salah. Landfill site selection using GIS, remote sensing and multicriteria decision analysis: case of the city of Mohammedia, Morocco. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, no. 75, pp. 1301–1309.
 29. Nakhaei, M., Amiri, V., Rezaei, K., Moosae, F. An investigation of the potential environmental contamination from the leachate of the Rasht waste disposal site in Iran. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2015, no. 74, pp. 233–246.
 30. Ogola, J.S., Chimuka, L., Tshivhase, S. Management of Municipal Solid Wastes: A Case Study in Limpopo Province. *South Africa Integrated Waste Management*, 2011, vol. 1, pp. 91–112.
 31. Rahmat, Z.G., Niri, M.V., Alavi, N. et al. Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, vol. 21, is. 1, pp. 111–118.
 32. Yannah, M., Martens, K., Van Camp, M., Walraevens, K. Geophysical exploration of an old dumpsite in the perspective of enhanced landfill mining in Kermt area, Belgium. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2019, no.78, pp. 55–67.
 33. Zelenović Vasiljević, T., Srdjević, Z., Bajčetić, R. et al. GIS and the Analytic Hierarchy Process for Regional Landfill Site Selection in Transitional Countries: A Case Study From Serbia. *Environmental Management*, 2012, vol. 49, is. 2, pp. 445–458.

УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.4.02

ПРАВОВОЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНЕНИЯ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ В СТРАНАХ ЕС

© 2021 г. И. Н. Заиканова*

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

**E-mail: izaikanova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.10.2020 г.

После доработки 18.11.2020 г.

Принята к публикации 22.11.2020 г.

В настоящее время решение проблем утилизации отходов в мировом масштабе является частью постоянно модернизирующегося проекта устойчивого развития. Для поэтапного внедрения концепции управления отходами законодательные акты стран ЕС устанавливают требования к различным аспектам обращения с отходами и создают условия для их достижения. Иерархия управления отходами отдает приоритет предотвращению отходов, за которым следует подготовка к повторному использованию, рециркуляция, другое извлечение и, наконец, утилизация как наименее желательный вариант. Технические, организационные и финансовые концепции устойчивого управления отходами и ресурсами рассматриваются в ходе национальных и международных экспертных дискуссий, а также в рамках проектов сотрудничества в целях развития. Показатели стран ЕС и показатели РФ как по характеру отходов, так и по их количеству на душу населения несравнимы. Перспективы достижения цели по утилизации муниципальных отходов в 50% к 2020 г. неоднозначны. Этот уровень утилизации уже достигнут шестью странами в соответствии с самым требовательным методом расчета. Нескольким странам придется активизировать свои усилия для достижения этой цели. В статье содержатся примеры рациональной организации хранения отходов и их утилизации в некоторых странах ЕС. Широкий анализ конкурентности высоко развитых государств в части предложений по размещению отходов позволил установить, что для ограничения расходов на утилизацию и увеличения возможностей вторичного использования отходов, очень важное значение имеет высокий уровень инвестиций в науку и инновационные проекты.

Ключевые слова: *твердые коммунальные отходы, устойчивое развитие, повторное использование, утилизация, хранение, управление отходами*

DOI: 10.31857/S0869780921010094

ВВЕДЕНИЕ

Самая первая из известных науке свалок датируется 3000 лет до нашей эры. Она была расположена на острове Крит, недалеко от столицы древнего критского государства – г. Кносс. Мусор сбрасывался в большие ямы, которые потом на разных уровнях засыпали землей. Известно также, что городские власти Греции начали заниматься вопросами захоронения отходов почти 2500 лет назад: чиновники античных Афин предписали гражданам вывозить мусор не ближе, чем за 1.5 км от городских ворот. Спустя несколько тысяч лет человечество так и не смогло найти рецептов избавления от отходов своей жизнедеятельности. Более того, чем более цивилизованной становилась страна, тем больше ресурсов она потребляла и тем больше отходов производила [2].

В настоящее время решение проблем утилизации отходов в мировом масштабе является частью постоянно модернизирующегося проекта устойчивого развития. Система решений ООН по устойчивому развитию (Sustainable Development Solutions Network (SDSN)) мобилизует глобальный научно-технический опыт для содействия практическому решению этой проблемы¹.

SDSN вовлекает академическое сообщество для перевода его наработок устойчивого развития в практическое русло. Для этого предусматривается построение глобальной сети университетов, исследовательских центров и других институтов, ориентированных на:

– предоставление и мобилизацию поддержки SDSN;

¹ <http://unsdsn.org/>

– продвижение практических решений Инициативы и долгосрочных путей устойчивого развития;

– содействие качественному сотрудничеству в области образования и исследований для устойчивого развития;

– поддержку правительств в понимании и решении проблемы устойчивого развития. Сеть SDSN, охватывающая шесть континентов, опирается на знания и образовательный потенциал более 650 учреждений-членов.

193 страны-члены ООН, в сентябре 2015 г. приняли и единогласно поддержали 17 целей в области устойчивого развития SDSN, ради установления амбициозных задач и для того, чтобы до 2030 г. положить конец крайней нищете, содействовать экономическому процветанию, расширению социальной интеграции, обеспечить экологическую устойчивость на основе мира, справедливости и сильных институтов.

Достижение SDSN потребует глубоких преобразований, включая такие показатели, как, например, сдвиг к низкоуглеродной энергетике; повсеместной и надежной информационной связи; обустройство здоровых и устойчивых городов, что подразумевает в качестве одного из главных индикаторов оптимизацию хранения и утилизации городских твердых коммунальных отходов (ТКО)².

Цель данной статьи – обратить внимание научного сообщества и органов власти на положительный опыт стран ЕС в деле управления (экономики) ТКО и обеспечения геоэкологической безопасности при их утилизации.

ОБЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ И ТАКТИКИ СТРАН ЕС В ДЕЛЕ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТКО С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СТРАН

В странах ЕС режим управления отходами предполагает наличие интегрированной системы различных направлений деятельности: социальных, экономических, нормативно-правовых, управленческих, технических. Для поэтапного внедрения концепции управления отходами законодательные акты стран ЕС, с одной стороны, устанавливают требования к различным аспектам обращения с отходами с учетом целевых показателей развития (целевой показатель степени извлечения вторичного сырья и переработки, количества компостных фракций, направляемых на захоронение), с другой стороны, создают условия для их достижения. Юридическая и физическая ответственность за каждую задачу управления от-

ходами делегируется на различных уровнях власти (федеральном, субъекта федерации, муниципальном). Политика управления отходами в странах ЕС была разработана более 30 лет назад с целью гармонизации сферы обращения с отходами и предотвращения неправильного развития технологий в рыночных условиях.

За последние два десятилетия европейские страны все больше смещают свое внимание в отношении муниципальных отходов с методов утилизации на их предотвращение и переработку. Перемещение управления муниципальными отходами вверх по “иерархии отходов” необходимо для извлечения большей ценности из ресурсов при одновременном снижении нагрузки на окружающую среду и создании рабочих мест.

Хотя муниципальные отходы составляют лишь около 10% от общего объема отходов, образующихся в ЕС [10], они очень заметны, и элиминация таких отходов может снизить их воздействие на окружающую среду не только на этапах потребления, но также на протяжении всего жизненного цикла потребляемых продуктов. Страны, которые разработали эффективные муниципальные системы управления отходами, в целом работают лучше в управлении всеми видами отходов на государственном уровне.

Политика и цели в отношении отходов, установленные на уровне ЕС, включают минимальные требования к управлению определенными типами отходов. Наиболее важными целевыми показателями для муниципальных отходов являются показатели, принятые в соответствии с “Директивой о свалках для биоразлагаемых муниципальных отходов”³; “Директивой об утилизации упаковки и отходов”⁴ и целью – “Рамочной директивой об отходах по переработке и подготовке к повторному использованию”⁵ (точнее, цель применяется к конкретным типам бытовых и сопровождающих их отходов) [8, 16]. Страны могут выбирать между предложенными различными методами для мониторинга прогресса в достижении поставленной цели. Согласно принятым методам, расчет коэффициентов рециркуляции осуществляется по наиболее строгому подходу, т.е. коэффициент рециркуляции определяется как масса утилизируемых муниципальных отходов, деленная на произведенные муниципальные отходы.

Страны ЕС используют различные инструменты политики для отвода отходов со свалок и продвижения в направлении их дальнейшей переработки:

³ EU Directive on the Landfill of Waste | Environmental XPRIT

⁴ Packaging and packaging waste directive 94/62/EC

⁵ Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive)

² <http://unsdsn.org/>

1. Страны, использующие многие из инструментов, перечисленных в указанных выше директивах, имеют более высокий уровень утилизации муниципальных отходов, чем страны, использующие мало или вообще не имеющие таких инструментов. Однако способ объединения инструментов политики может быть более актуальным, чем общее количество инструментов.

2. В большинстве стран было разработано более двух национальных планов обращения с отходами, однако показатели их переработки значительно различаются. Нет систематической разницы в эффективности между странами с национальными планами и странами только с региональными планами.

3. Многие страны используют схемы “плати за выброс” (т.е. сборы, основанные на весе или объеме отходов, в качестве экономического стимула для домашних хозяйств перерабатывать свои отходы). Уровень их реализации значительно варьируется в зависимости от страны и внутри стран. Тем не менее, во всех странах с показателями рециркуляции выше 45% используется аналогичная система, в то время как в большинстве стран с уровнем рециркуляции ниже 20% они не используются, это указывает на то, что схемы с оплатой по факту выбрасывания являются эффективным инструментом, стимулирующим рециркуляцию.

4. Все страны, в которых показатели захоронения отходов значительно ниже среднего показателя по ЕС-28, составляющего 28%, либо запретили захоронение биоразлагаемых или смешанных муниципальных отходов, либо ввели запрет в сочетании с налогом на захоронение.

Перспективы достижения цели по утилизации муниципальных отходов до 50% к 2020 г. для разных стран неоднозначны. Этот уровень утилизации уже принят шестью странами ЕС в соответствии с наиболее требовательным методом. Однако нескольким странам придется активизировать свои усилия для достижения этой цели, особенно в пяти странах в настоящее время перерабатывается менее одной пятой образующихся муниципальных отходов.

Опыт систематизации данных по отходам показывает необходимость усовершенствования и согласования методологий представления национальной отчетности, поскольку неопределенности, связанные с сопоставимостью национальных данных, являются препятствием для обобщенной оценки прогресса и эффективности мер политики. Призвано помочь в этом отношении законодательное предложение о внесении поправок в Рамочную директиву по отходам, которое также включает обзор целевых показателей для бытовых и упаковочных отходов и пересмотр определений и методов.

Иерархия управления отходами отдает приоритет предотвращению отходов, за которым следует подготовка к повторному использованию, рециркуляция, другое извлечение и, наконец, утилизация как наименее желательный вариант.

В 2015 г. Европейская комиссия предложила новые цели по управлению муниципальными отходами, предусматривающие переработку и подготовку к повторному использованию 60% ТКО к 2025 г. и 65% — к 2030 г. Они основаны только на одном методе расчета — примерно таком, который использовался в указанном выше расчете коэффициентов рециркуляции, с возможностью выбора времени осуществления этого предписания. Были приняты также отступления для некоторых стран с учетом их экономических проблем. Кроме того, были предложены новые показатели по сокращению муниципальных отходов, утилизируемых на свалке, и пересмотрены нормативы для отходов упаковки. Количество ТКО на человека в странах ЕС представлено на рис. 1.

Общая выработка муниципальных отходов в странах Европейской экономической зоны (ЕЭЗ) сократилась на 3% в абсолютном выражении, а средняя выработка на человека на 7% в период 2004–2014 гг. В 2014 г. образование муниципальных отходов на человека было самым высоким в Дании и Швейцарии и самым низким в Румынии, Польше и Сербии. Это отражает тот факт, что более богатые страны, как правило, производят больше муниципальных отходов на человека, в то же время туризм способствует высокому уровню выработки отходов на Кипре и на Мальте.

Одной из особенностей успеха экологической политики в Европе является увеличение скорости утилизации муниципальных отходов (включая переработку материалов и компостирование биологических отходов).

В Европе четверть образуемых отходов утилизируется в печах. Тепло используется для обогрева здания мусороперерабатывающего завода или на производственные нужды (сушку, очистку поступающих отходов). Основные термические методы вторичной переработки: слоевое сжигание неподготовленных отходов в специальных установках; использование гранулированного топлива, получаемого из горючего мусора; применение пиролизного газа для водогрейных установок; температурный пиролиз (разложение углеводородов на газообразные, жидкие и твердые компоненты в вакууме или под давлением). Сжигают древесные, бумажные отходы, которые нельзя использовать как вторсырье.

В результате биологического разложения растительных остатков, отходов сельхозпроизводства (растениеводства, животноводства), ветхой бумаги, картона, текстиля из натуральных материалов (хлопка, бамбука) получают ценное удоб-

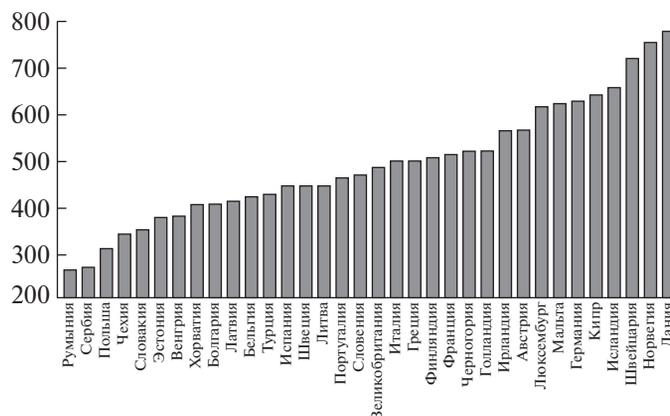


Рис. 1. Количество ТКО на человека в год (в кг) в странах ЕС [13].

рение. Вторичное использование биомусора не предусматривает больших затрат. При компостировании разложение происходит за счет внутренней энергии молекул, процесс происходит с выделением тепла.

Относительным новшеством является плазменная обработка отходов — это современная технология утилизации того, что нельзя использовать как вторсырье. Отходы без предварительной подготовки помещают в плазматрон. Плазма, создаваемая постоянным электрическим током, нагревается свыше 1000°C. Бесформенная гора утиля превращается в стекловидный комок [1].

В свою очередь Европейская торговая ассоциация переработки отходов в энергию ESWET представила доклад “Энергия из отходов 2050: чистые технологии для устойчивого развития отрасли”, в котором прописаны стратегические задачи, стоящие перед сектором на ближайшие три десятилетия. Там сказано, что заводы по термической переработке должны быть максимально интегрированы в городскую среду и в конечном счете взять на себя утилизацию всех отходов, не подлежащих вторичному использованию⁶.

Повышение уровня утилизации и снижение уровня захоронения отходов четко связаны между собой. Как правило, захоронение отходов происходит гораздо быстрее, чем рост утилизации, поскольку стратегии управления отходами в основном переходят от захоронения к комбинации утилизации и сжигания, а в некоторых случаях и к механико-биологической обработке.

Уровень захоронения бытовых отходов в 32 странах-членах ЕС снизился в целом, хотя показатели отдельных стран были разными. В Австрии, Бельгии, Дании, Германии, Нидерландах, Норвегии, Швеции и Швейцарии практически никакие муниципальные отходы не отправляются на свалку.

⁶ W2e.ru>Блог>energiya-iz-otkhdov

С другой стороны, Кипр, Хорватия, Греция, Латвия, Мальта и Турция по-прежнему размещают на свалках более 75% своих муниципальных отходов. Наибольшее снижение произошло в Эстонии (57%), Финляндии (40%), Словении (41%) и Великобритании (43%).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ В НЕКОТОРЫХ СТРАНАХ ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ

Принятые в Германии подходы к отчетности по отходам признаются “направленными”, то есть ориентированными на достижение конкретных целей. Одним из них является 2030Wach Indikator, т.е. количество твердых коммунальных отходов, приходящихся на человека. Новый индикатор 2030Wach был предложен для того, чтобы растущая проблема отходов не терялась из виду.

Так, согласно 2030Wach индикатору в настоящее время в Германии на человека приходится 627.0 кг ТКО, а должно к 2030 г. быть не более 100.0 кг, т.е. 19% от нынешнего уровня. Это значение было сформулировано немецкими экологическими организациями в качестве цели на 2030 г. Надо отметить, что с 2016 г. эта величина уже сократилась, так как тогда на человека приходилось 725.0 кг отходов.

Несколько слов об этой программе. Программа 2030Wach и ее индикаторы в Германии воспринимается как немецкая стратегия устойчивости, а роль индикаторов состоит в том, что они выявляют нераскрытые темы государственной политики, правильные цели и определяют лучшую внутреннюю политику. Одной из таких важнейших сфер индикаторов эффективности работы Службы охраны окружающей среды правительства Германии является рациональное использование ресурсов и отходов. Согласно принципам устойчивого развития, начиная с 2012 г. высшим приоритетом

правительства является сокращение отходов. Наиболее оптимальной признана программа использования отходов, получившая название “вторичная стратегия”. До сих пор Германия относилась к странам с высоким показателем объема образующихся отходов на человека. На этом фоне редукция количества бытовых отходов становится чувствительным индикатором устойчивой внутренней политики.

При этом отходами считаются коммунальные, производственные, а также отходы бюро и общественных институций, независимо от того, были ли они сожжены, или как-то иначе уничтожены или, наоборот, переработаны или утилизируются на полигонах. В эту категорию не входят отходы сельского хозяйства и индустрии [14].

К категории муниципальных отходы относятся отходы частных домовладений и аналогичных учреждений, а также бытовые и аналогичные отходы торговли и промышленности, например, отходы кабинетов врачей и адвокатов, административных зданий, школ, детских садов, больниц и домов престарелых. Кроме того, муниципальные отходы также включают крупногабаритные отходы, рыночные отходы, мусор уличных подметальных машин, биоотходы и отдельно собираемые ценные материалы, такие как стекло и бумага. Фекалии и осадок сточных вод также причислены к муниципальным отходам.

Для сравнения, в Российской Федерации к типу коммунальных отходов относятся отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд [4]. При этом объем ТКО в нашей стране ежегодно увеличивается: в настоящее время этот показатель составляет уже около 500–800 кг в год на каждого жителя больших городов [3]. Из приведенных данных видно, что показатели стран ЕС и показатели РФ как по систематизации отходов, так и по их количеству на душу населения несравнимы.

В Германии экологически безопасную утилизацию отходов обеспечивают муниципалитет или его агенты. Отходы, которые могут быть переработаны, должны быть переработаны в максимально возможной степени (например, путем производства компоста из биологических отходов, стекла или бумаги) или использованы для рекуперации энергии. Не подлежащие переработке остаточные отходы направляются на механико-биологическую обработку или сжигание. Только остатки от этой обработки и уже инертные отходы размещаются на свалках. Надо отметить, что менее всего в указанных выше нормативных актах, касающихся коммунальных отходов стран ЕС,

принимается во внимание вопрос геоэкологической безопасности.

Что касается транспортировки, хранения и утилизации коммунальных отходов в ЕС, то уникальным примером этому, в частности, может служить современное управление отходами в стокгольмском районе Хаммарбю Сьёстад (Hammarby Sjöstad). Пример этого района еще раз демонстрирует: не нужно больше тонн и контейнеров, вместо этого есть разные виды колонн для вбрасывания отсортированных жителями остатков разного вида коммунальных отходов и бумаги. Пользователи входят в колонну для органических отходов с помощью чековой карты, чтобы избежать поступления в нее посторонних веществ. Опыт Швеции показал, что существует потребность в социальном контроле, т.е. люди должны правильно сортировать вещи, и это то, что они делают лучше всего, когда их действия контролируются.

Вот почему колонны для сбора коммунальных отходов всегда здесь расположены в самых доступных местах: во дворах или на лестницах. Как только труба под колонной наполняется, открывается клапан, и отходы всасываются через подземную систему труб со скоростью 70 км/час, как большим пылесосом. В нескольких центральных пунктах подземного сбора мусора отходы всего района собираются и удаляются только тогда, когда это необходимо. Более 3000 домохозяйств подключены к этой системе. Большим преимуществом является то, что отходы больше не нужно перевозить автомобильным транспортом и хранить вдали от домов, в открытых хранилищах – все находится под землей.

Управление сточными водами также является образцовым на предприятии, расположенном недалеко от Хаммарбю Сьёстаде. Сточные воды района, насчитывающего 900 тыс. человек, в Стокгольме рециркулируются. Отработанное тепло используется для отопления и, наоборот, холодная вода для охлаждения на складах супермаркетов. Оставшийся осадок сточных вод также используется и сбрасывается вместе с органическими отходами в биогаз и становится экологически чистым топливом, который направляется через трубопроводы в автобусный парк, где заправляются все городские автобусы Стокгольма [12].

Надо признать, что приведенный выше пример обращения с коммунальными отходами является уникальным. Управление отходами имеет множество взаимосвязей и с другими темами, такими как развитие городов, водоснабжение, энергетика и продовольственная безопасность. Проектирование управления отходами основывается на результатах завершенных и текущих программ, на сравнении опыта стран международного сотрудничества в области развития и

учитывает экологические, социальные и экономические аспекты обращения с отходами и применяется в странах с разными экономическим и экологическим потенциалом.

В качестве примера можно привести также проект “Модернизация муниципальных служб” в Косово, в котором используются уже разработанные руководящие принципы, касающиеся моделей операторов для структурирования управления отходами. Вместе с консалтинговым проектом в Косово был разработан учебный модуль, с помощью которого обучаются сотрудники органов власти и компаний по удалению отходов. Нечто подобное планируется и для других стран ЕС.

Технические, организационные и финансовые концепции устойчивого управления отходами и ресурсами в ЕС рассматриваются в ходе национальных и международных экспертных дискуссий, а также в рамках проектов сотрудничества в целях развития [11].

ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ БАЗА РЕСПУБЛИКИ ПОЛЬШИ О СОСТАВЕ ТКО И БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИГОНОВ ОТХОДОВ

Несколько иначе трактуется тема коммунальных отходов в странах Восточной Европы, например, в Польше, где под ними понимаются отходы, не связанные с промышленной деятельностью человека. Закон об этих отходах от 14.12.2012 г. [15] определяет коммунальные отходы как отходы, производимые в домашних хозяйствах, за исключением автомобилей, вышедших из пользования, а также отходы, не содержащие опасных составляющих, которые по своему характеру или составу похожи на отходы, производимые в домашних хозяйствах. По мнению С. Росик-Дулевской [14] чаще всего в Польше состав коммунальных отходов включает:

- 40–50% органические субстанции;
- максимум 60% – минеральные (в том числе ~30% – это зола печного происхождения).

Этот автор выделяет также 4 группы коммунальных отходов:

1. Отходы, не пригодные к потреблению: бумажные, из синтетических материалов, стекло, металлы, текстиль. Составляют 30% массы твердых коммунальных отходов.

2. Отходы, которые редко трактуются как вторичные ресурсы: органические отходы – остатки пищевых. Составляют 50% всех коммунальных отходов.

3. Отходы разного рода горючих веществ, прежде всего от обогрева помещений и домов (до 20% массы отходов). Неорганические отходы этого типа не рассматриваются как вторичные.

4. Довольно немногочисленная группа отходов, часть которых может использоваться в качестве вторичного сырья (например, остатки бытовой химии и др.).

Свалки бытовых отходов в городах Польши до конца XX в. за редким исключением имели самодельные установки для их обезвреживания. В настоящее время они являются одним из элементов общего оборудования свалки по утилизации отходов.

Согласно польскому законодательству формой обеспечения безопасности отходов является их складирование, которое в свою очередь определено как совокупность процессов их биологического, химического или физического преобразования с целью приведения отходов к состоянию, когда они не представляют угрозы для жизни и здоровья людей или окружающей среды. Это условие следует из распоряжения министра окружающей среды в вопросах, касающихся локализации, строительства, эксплуатации и закрытия свалок отходов. Важно отметить, что для обеспечения геологической безопасности проект геологических изысканий, т.е. разработки инженерно-геологической и гидрогеологической документации, включает в качестве обязательного элемента выдачу заключения об условиях строительства и использования территории для свалки отходов, как первого шага ее инвестиционной процедуры.

В состав изысканий под размещение свалок входят:

- инвентаризация всех поверхностных водотоков и горизонтов подземных вод территории планируемого хранилища отходов и ее окружения;

- гидрогеологический баланс количества поступающих и отходящих из хранилища вод в ходе его эксплуатации;

- изучение геологического строения территории и ее окружения, включающее:

- а) исследование геологического строения территории на основе как минимум 5 скважин с глубиной, достаточной для изучения водоносного и водоупорного горизонтов, при том, что минимальное количество скважин должно быть не менее 1 на 1 га территории изысканий;

- б) определение показателя фильтрации каждого литологического пласта, составляющего геологическое строение территории;

- в) исследование пространственного тектонического строения территории и ее окружения;

- гидрометеорологические данные:

- а) среднегодовое количество осадков на основе данных ближайшей метеостанции;

б) величина годового максимального количества осадков за период последних 30 лет, на основе данных этой станции;

в) предполагаемое количество воды, которое может содержаться в складированных отходах;

г) допустимое количество воды, которое может быть поглощено данными отходами;

д) коэффициент испарения данной территории и т.д.

В целом, для обеспечения безопасности геологической среды каждое хранилище отходов должно быть так локализовано, чтобы имело естественный барьер, блокирующий поступление вод в нижележащие слои и в боковые стены хранилища ТКО. Важно, чтобы предполагаемый наивысший пьезометрический уровень подземных вод был как минимум на 1 м ниже запроектированного уровня днища хранилища отходов.

Если нет возможности размещения хранилищ отходов в местах с естественным геологическим гидроизолирующим барьером, используют искусственно созданный геологический барьер минимальной мощности 0.5 м с соответствующим коэффициентом фильтрации. Дополнением этих видов изоляции нижележащих слоев может быть их синтетическая изоляция.

В Польше решение о строительстве хранилища отходов, согласно 52 статьи закона “Об отходах” [15], должно включать еще такие данные:

– название и адрес организации, принявшей решение, а также управляющего хранилищем отходов, если это разные субъекты, а также адрес хранилища отходов;

– виды отходов, предполагаемые для складирования в данном хранилище;

– предполагаемое ежегодное и общее количество складированных отходов и объем хранилища;

– описание территории предполагаемой свалки коммунальных отходов, особенно ее геологическая и гидрогеологическая характеристика;

– описание способов, применяемых для исключения загрязнения окружающей среды или ограничения количества отходов и их негативного воздействия на среду;

– план, касающийся эксплуатации, управления и мониторинга состояния хранилища отходов;

– план относительно закрытия хранилища, а также послеэксплуатационные мероприятия;

– способы защиты от аварий и мероприятия в случае, если они будут иметь место.

Согласно этому закону, хранилище коммунальных отходов должно быть окружено зеленым поясом (минимум – 10 м ширины), состоящим из деревьев и кустарников, с целью ограничения до минимума неблагоприятного воздействия и опас-

ностей, возникающих в результате эмиссии запахов и пыли, разноса отходов ветром, шума, движения на дорогах, деятельности животных, возникновения пожаров и распространения аэрозолей.

НЕКОТОРЫЕ ПРАВИЛА ОБУСТРОЙСТВА И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИГОНОВ ТКО, ПРИНЯТЫЕ В РФ

В отличие от аналогичного закона Республики Польша, Федеральный закон РФ от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ “Об отходах производства и потребления” [4] только упоминает, но не содержит требований по обеспечению геологической безопасности мест хранения ТКО. То же касается сформулированного в 2018 г. Постановления Правительства РФ № 1039 “Об утверждении Правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их реестра” [7], в котором регламентирован порядок создания, согласования и правила формирования и ведения реестра мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов.

Требования по обеспечению геологической безопасности площадки, предназначенной под размещение полигонов ТКО, содержатся в СП 320.1325800.2017 [9], где обозначены следующие условия, необходимые для согласования строительства хранилища ТКО:

– геологическое строение, характеризующееся однородностью в пределах всей площадки;

– гидрогеологические условия, характеризующиеся залеганием водоносных слоев на глубине не менее 5 м;

– отметка основания ложа полигона должна находиться на 2 м выше расчетного горизонта грунтовых вод;

– необходима ровная территория, исключающая возможность смыва атмосферными осадками части отходов и загрязнения ими прилегающих земель и открытых водоемов;

– расположение с подветренной стороны (для ветров преобладающего направления) по отношению к муниципальным образованиям и рекреационным зонам;

– не допускается размещение участка под полигоны ТКО на территории оврагов.

Считаем необходимым особо остановиться на положительном опыте Запада по разработке системы целеполагания при решении сложных, требующих большого числа специалистов, управленцев, общественности и т.д., комплексных проблем, к которым, в частности, относится оптимизация хранения и утилизации ТКО. К сожалению, наши законодатели видят в этом направлении единственный образ действия – создание нормативной системы запретов и ограничений, без определения целей по разным видам деятель-

ности в части управления отходами, например, в виде директив для соответствующих министерств, ведомств и научного сообщества, которые продвигаясь одновременно каждый в своем направлении, обеспечили бы оптимальное и быстрое решение этой проблемы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пока российские мусорные свалки и отвалы занимают площади, сравнимые с площадью таких государств, как Нидерланды (4.15 млн га) или Швейцария (4.12 млн га), они вдвое больше Израиля (2.2 млн га) или Словении (2.0 млн га). Причем эта площадь ежегодно увеличивается на размер территории Москвы в ее новых границах. Однако, если следовать логике принимаемых решений, а также стандартам ЕС, то количество свалок и занимаемая ими площадь в последующем должны сокращаться. Так, например, в Германии, где более 60% муниципальных отходов перерабатывается, уже с 1.06.2005 г. на свалки запрещено сбрасывать необработанные, биоразлагаемые муниципальные отходы, тогда как не подлежащие переработке остаточные отходы должны направляться на механико-биологическую обработку или сжигание отходов. Только остатки от этой обработки и уже инертные отходы размещаются на свалках. К сожалению, эти тенденции в управлении отходами наше российское законодательство только начинает развивать [5–7, 9 и др.].

Широкий анализ конкурентности высоко развитых государств в части предложений по размещению отходов позволил установить, что для ограничения расходов на утилизацию и увеличения возможностей вторичного использования отходов, очень важное значение имеет высокий уровень инвестиций в науку и инновационные проекты, которые показали свою эффективность, например, в таких странах как Австралия и Канада. Доказано, что научные исследования и вложения в совершенствование технологий необходимы для экологической безопасности и конкурентоспособности государства и только субъекты, способные осуществить инновационные реформы в области размещения и переработки ТКО, смогут сохранить природную среду и сырьевой баланс государства.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА-А19-119101890052-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вторичная переработка мусора: что можно переработать вторично? URL: <https://bezotxodov.ru/pererabotka/vtorichnaja-pererabotka-othodov#i-2>
2. Европейская практика обращения с отходами: проблемы, решения, перспективы. СПб.: Изд-во

“Региональное Энергетическое Партнерство”, 2005. 73 с.

3. Мочалова Л.А., Гриненко Д.А., Юрак В.В. Система обращения с твердыми коммунальными отходами: зарубежный и отечественный опыт // Известия УГГУ. 2017. Вып. 3 (47). С. 97–101.
4. Об отходах производства и потребления: ФЗ от 24.06.1998 г. № 89–ФЗ (ред. от 14 июня 2020 года) URL: <http://docs.cntd.ru/document/901711591>
5. Постановление Правительства от 18.06.2019 № 734–ПП “О реализации мероприятий по раздельному сбору (накоплению) твердых коммунальных отходов в городе Москве”. URL: <http://docs.cntd.ru/document/560344806>
6. Постановление Правительства РФ от 22 сентября 2018 г. № 1130 “О разработке, общественном обсуждении, утверждении, корректировке территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также о требованиях к составу и содержанию таких схем” (не вступило в силу). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201809250026>
7. Постановление Правительства РФ от 31 августа 2018 г. № 1039 “Об утверждении Правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их реестра”. URL: <http://docs.cntd.ru/document/551031834>
8. Система управления отходами в странах ЕС. URL: <http://waste-nn.ru/sistema-upravleniya-othodami-v-stranah-es>
9. СП 320.1325800.2017 Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. URL: <http://docs.cntd.ru/document/556610331>
10. Статистика Евросоюза по бытовым отходам <https://www.gsvm.ru/news/statistika-evrosoyuza-po-bytovym-othodam>
11. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. URL: <https://www.giz.de/de/weltweit/15109.html>
12. Innovatives Abfallmanagement in Stockholm URL: <https://www.br.de/br-fernsehen/sendungen/euroblick/euroblick-schweden-abfall-100.html>
13. Municipal waste management across European countries. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste/municipal-waste-management-across-european-countries>.
14. Rosik-Dulewska C. Podstawy gospodarki odpadami. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 2000. P. 49–52. (на польском)
15. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. O odpadach. URL: <https://www.infor.pl/akt-prawny/DZU.2018.003.0000021,ustawa-o-odpadach.html> (на польском)
16. Waste-Environment-European-Commission. URL: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>

LEGAL APPROACH TO MANAGEMENT AND ENSURING SAFE DISPOSAL OF MUNICIPAL WASTE IN EU COUNTRIES

I. N. Zaikanova^{a,#}

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101111 Russia*

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

Solving waste management problems on a global scale is currently a part of an ever-modernizing sustainable development project. For the step-by-step implementation of the waste management concept, EU legislative acts adopt requirements for various aspects of waste management and create conditions for their achievement. The waste hierarchy gives priority to waste prevention, followed by preparation for reuse, recycling, re-extraction, and finally disposal as the least desirable option. Technical, organizational and financial concepts for sustainable waste and resource management are addressed through national and international expert discussions, as well as through development cooperation projects. The indicators of the EU countries and the indicators of the Russian Federation both in terms of the nature of the waste and its quantity per capita are not comparable. The EU's prospects for reducing municipal waste disposal by 50% by 2020 are not yet achievable. This level of recycling has been achieved by only six countries according to the most demanding calculation method. Several countries will have to speed up their efforts to achieve this goal. As a result of biological decomposition of plant residues, agricultural waste, decrepit paper, cardboard, textiles out of natural materials, valuable fertilizer is obtained. Plasma treatment is a modern technology for the disposal of what cannot be used as recyclables. The 2030Wach program and its indicators in Germany are perceived as a country's sustainability strategy. The use of waste, called the "secondary strategy," is recognized as the most optimal. Until now, Germany has been among the countries with a high rate of generated waste per person. According to the Polish law, a form of ensuring the safety of waste is their storage, which in turn is defined as a set of processes of their biological, chemical or physical conversion. This level of recycling has already been achieved by six countries according to the most demanding calculation method. The article contains examples of the rational organization of waste storage and disposal in some EU countries. A comprehensive analysis of the competitiveness among highly developed countries in terms of waste disposal offers allowed us to establish that in order to limit the costs of disposal and increase the possibilities of recycling waste, a high level of investment in science and innovative projects is very important.

Keywords: *municipal solid waste, sustainable development, reuse, recycling, storage, waste management*

REFERENCES

1. *Vtorichnaya pererabotka musora: chto mozno pererabotat' vtorichno?* [Recycling of waste. What can be recycled?] URL: <https://bezotxodov.ru/pererabotka/vtorichnaja-pererabotka-otxodov#i-2> (in Russian)
2. *Evropeiskaya praktika obrashcheniya s otkhodami: problemy, resheniya, perspektivy* [European waste management practice: problems, solutions, prospects]. St. Petersburg, Regional'noe Energeticheskoe Partnerstvo, 2005, 73 p. (in Russian)
3. Mochalova, L.A., Grinenko, D.A., Yurak, V.V. *Sistema obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami: zarubezhnyi i otechestvennyi opyt* [Solid municipal waste management system: foreign and domestic experience]. *Izvestiya UGGU*, 2017, no.3 (47), pp. 97–101. (in Russian)
4. *Ob otkhodakh proizvodstva i potrebleniya* [About production and consumption waste]: FZ N89 ot 24.06.1998 (red. 14.06.2020). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901711591> (in Russian)
5. *Postanovlenie Pravitel'stva Moskvy ot 18.06.2019 N734-PP "O realizatsii meropriyatii po razdel'nomu sboru (nakopleniyu) tverdyykh kommunal'nykh otkhodov v gorode Moskve"* [Decree of the Moscow government 18.06.2019 N734-DG "On the implementation of measures for the separate collection (accumulation) of solid municipal waste in Moscow"]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/560344806>
6. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 22.09.2018 g. N1130 "O razrabotke, obshchestvennom obsuzhdenii, utverzhdenii, korrektyrovke territorial'nykh skhem v oblasti obrashcheniya s otkhodami proizvodstva i potrebleniya, v tom chisle s tverdymi kommunal'nymi otkhodami, a takzhe o trebovaniyakh k sostavu i soderzhaniyu takikh skhem"*. [Decree of the government of the Russian Federation on 22.09.2018 N1130 "On the development, public discussion, approval, adjustment of territorial schemes in the field of industrial and consumer waste management, including solid municipal waste, as well as on the requirements for the composition and content of such schemes"]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201809250026> (in Russian)
7. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 31.08.2018 g. N1039 "Ob utverzhdenii Pravil obustroystva mest (ploshchadok) nakopleniya tverdyykh kommunal'nykh otkhodov i vedeniya ikh reestra"* [Decree of the government of the Russian Federation of 31.08.2018 N1039 "About approval of Rules of arrangement of places (platforms) of accumulation of solid municipal waste and maintaining their register"]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/551031834> (in Russian)
8. *Sistema upravleniya otkhodami v stranakh ES* [Waste management system in EU countries]. URL:

- <http://waste-nn.ru/sistema-upravleniya-othodami-v-stranah-es>
9. *SP 320.1325800.2017 Poligony dlya tverdykh kommunal'nykh otkhodov. Proektirovanie, ekspluatatsiya i rekul'tivatsiya.* [Landfills for solid municipal waste. Design, operation and recultivation.]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/556610331>
 10. *Statistika Evrosoyuza po bytovym otkhodam* [EU statistics on municipal waste]. URL: <http://waste-nn.ru/sistema-upravleniya-othodami-v-stranah-es>
 11. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. URL: <https://www.giz.de/de/weltweit/15109.html> (in German)
 12. Innovatives Abfallmanagement in Stockholm URL: <https://www.br.de/br-fernsehen/sendungen/euroblick/euroblick-schweden-abfall-100.html> (in German)
 13. Municipal waste management across European countries. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/municipal-waste/municipal-waste-management-across-european-countries>. (in English)
 14. Rosik-Dulewska C. Podstawy gospodarki odpadami. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN S.A., 2000. P. 49–52. (in Polish)
 15. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. O odpadach. URL: <https://www.infor.pl/akt-prawny/DZU.2018.003.0000021,ustawa-o-odpadach.html> (in Polish)
 16. Waste-Environment-European-Commission. URL: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm> (in English)

ГРУНТОВЕДЕНИЕ
И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

**ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ
ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ ГИДРАТНЫХ ПЛЕНОК
ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

© 2021 г. **Ф. С. Карпенко^{1,*}, В. Н. Кутергин¹, С. И. Фролов¹, Р. В. Собин¹**

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

**E-mail: kafs08@bk.ru*

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

После доработки 23.09.2020 г.

Принята к публикации 05.10.2020 г.

Изменение прочности грунтов при воздействии температуры оказывает влияние на их устойчивость, безопасность строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Необходимость адаптации к таким изменениям и снижения их неблагоприятного воздействия требует разработки методики достоверного и объективного прогноза изменения прочностных свойств грунтов при различных температурах. Изменение прочностных свойств глинистых грунтов при температурном воздействии рассмотрено с позиций физико-химической механики. Показано, что реакция связанных дисперсных грунтов на температурное воздействие определяется свойствами гидратных пленок минеральных частиц, слагающих грунт. При флуктуациях температуры вода гидратных пленок может терять связь с частицами и переходить в свободную воду. Изменение толщины гидратных пленок вызывает изменение величины их расклинивающего давления, нарушая баланс сил взаимодействия частиц, что оказывает влияние на прочность грунта в целом.

Ключевые слова: *глинистые грунты, структурные контакты, гидратные пленки, α - и β -пленки, расклинивающее давление, общие эффективные напряжения, реальные эффективные напряжения*

DOI: 10.31857/S0869780921010033

ВВЕДЕНИЕ

С позиций современной физико-химической теории прочности, глинистые грунты рассматриваются как дисперсные системы. Образование дисперсных глинистых систем происходит в результате взаимодействия частиц глинистых минералов и гидратных пленок вокруг них и формирования контактов между частицами, на которых концентрируются передаваемые на грунт внешние нагрузки. Силы взаимодействия между частицами и расклинивающее давление гидратных пленок при условии полного водонасыщения грунта, т.е. при отсутствии действия капиллярных сил, суммарно определяют общую эффективную прочность глинистого грунта. Величина сил взаимодействия между частицами, называемая реальной эффективной прочностью, определяется минеральным составом частиц и типом контактов между ними и является постоянной для каждого конкретного грунта. В то же время, величина расклинивающего давления гидратных пленок может изменяться, оказывая влияние на прочность дисперсного глинистого грунта в целом. В первую очередь, это происходит при изменении температуры грунта, оказывающей влия-

ние на строение и свойства гидратных пленок частиц.

Влияние температурного фактора на прочность грунтов общепризнано, в практике инженерно-геологических исследований накоплено множество данных, свидетельствующих об этом. Особую актуальность проблема изменения устойчивости грунтов оснований инженерных сооружений приобретает в современных условиях изменения климата. В первую очередь это касается многолетнемерзлых грунтов криолитозоны, изменение устойчивости и несущих свойств которых при повышении температуры приводит к активизации неблагоприятных природных и техногенных процессов. Это газовые выбросы, воронки взрывов, просадки, деформации фундаментов, формирование и развитие криопэгов, обрушение берегов и склонов, солифлюкционные и другие процессы и явления.

Несмотря на свою значимость, влияние температурных условий на изменение прочностных свойств глинистых грунтов остается недостаточно изученным. Причины и закономерности таких изменений не вполне ясны, что затрудняет их прогноз для реальных условий строительства и

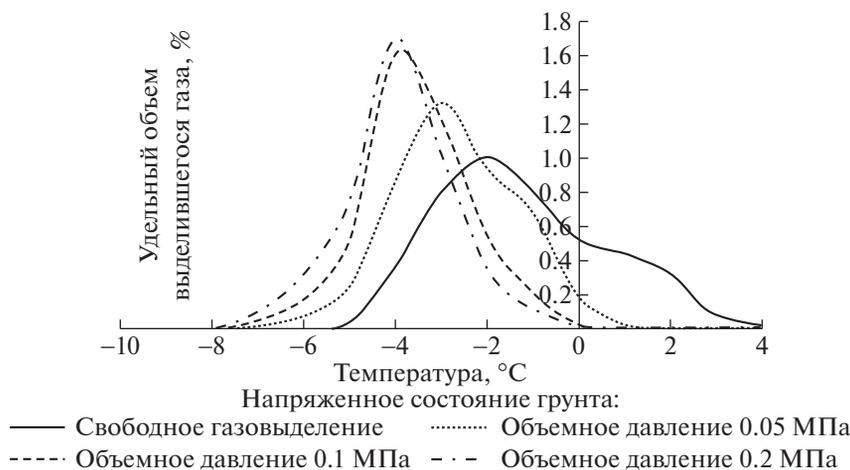


Рис. 1. Зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта.

эксплуатации инженерных сооружений. Важность и актуальность решения этих проблем определяют необходимость рассмотрения их с позиций физико-химической теории, основанной на изучении внутреннего строения глинистых грунтов и позволяющей описать закономерности его формирования и изменения под действием различных, в том числе температурных факторов.

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ОТ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ

Изменение прочностных свойств глинистых грунтов происходит при флуктуациях температур, как в положительной, так и в отрицательной областях значений. Это подтверждается результатами специальных проведенных экспериментальных испытаний прочности разновидностей глинистых грунтов в различных температурных условиях.

Строение и свойства мерзлых грунтов были изучены и описаны авторами [16, 17] на примере образцов глинистых пород участка южного берега Байдарацкой губы. Испытания проводились на твердых и тугопластичных суглинках при различных температурах. Характерная особенность испытанных грунтов — наличие в них различных форм (растворенные, адсорбированные и свободные) газовых включений [20], содержание которых достигает 4–5%.

Проведенные исследования показали, что повышение температуры мерзлых глинистых грунтов приводит к выделению содержащихся в них газов (рис. 1), что закономерно сопровождается изменением их строения и снижением значений показателей прочностных свойств — угла внут-

реннего трения ϕ и сцепления C (рис. 2). Эти изменения происходят уже при отрицательных температурах в условиях, при которых грунт в целом остается в мерзлом фазовом состоянии, а их интенсивность зависит от напряженного состояния, в котором находится грунт.

Изменение прочностных свойств связных дисперсных грунтов происходит и при воздействии положительных температур. Результаты проведенных испытаний разновидностей глинистых грунтов методом трехосного сжатия и микрокрыльчаткой, характерные графики которых приведены на рис. 3 и 4, соответственно, показывают, что повышение температуры приводит к закономерному снижению показателей прочностных свойств глин. Снижение прочности носит неравномерный характер, наиболее интенсивно оно идет в диапазоне температур от 0 до $+10^{\circ}\text{C}$, до достижения температуры $+40...+45^{\circ}\text{C}$ прочность практически не меняется, а при дальнейшем увеличении температуры до $+60^{\circ}\text{C}$ интенсивность снижения опять возрастает.

Приведенные данные подтверждают высказанное выше положение, что прочность дисперсных связных грунтов зависит от их температуры. Соответственно, температурные условия оказывают влияние на их устойчивость и несущую способность, а, следовательно, на развитие природных процессов и безопасность строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Это влияние проявляется как в области положительных, так и отрицательных температур, что становится особенно актуальным в современных условиях активного освоения арктического региона. Рассмотрение этого вопроса может быть проведено на основе характеристики процессов, происходящих в микроструктурном строении глинистых грунтов при изменении их температуры, исходя

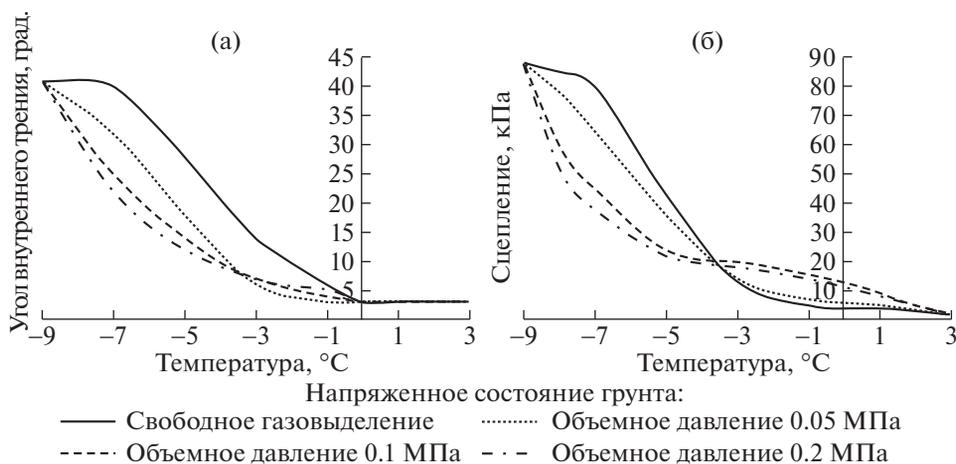


Рис. 2. Изменение прочности суглинков при газовыделении: а – угол внутреннего трения, б – сцепление.

при этом из базовых положений физико-химической теории реальной эффективной прочности дисперсных глинистых грунтов.

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ГИДРАТНЫХ ПЛЕНОК ЧАСТИЦ ГЛИНИСТЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

В основе современных научных представлений о строении глин лежит рассмотрение их как дисперсных систем, сложенных минеральными частицами глинистых минералов дисперсной фазы и водой – дисперсионной средой. Эти представления базируются на фундаментальных положениях теории ДЛФО – теории устойчивости дисперсных систем, независимо разработанной Б.В. Дерягиным, Л.Д. Ландау, Э. Фервеем и

Т. Овербеком (E.J. Verwey, J.Th.G. Overbeek), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера, теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина и обобщающей их физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах, разработанной В.И. Осиповым [13], В.И. Осиповым и В.Н. Соколовым [14] в отношении глинистых пород.

Генезис глин и формирование их микроструктуры происходит в результате образования структурных связей за счет действия сил притяжения и отталкивания между частицами и взаимодействия с водой в ходе литогенеза. Вода в микроструктуре глин не только заполняет поровое пространство, но и образует гидратный слой вокруг частиц, оказывая влияние на баланс сил взаимодействия частиц дисперсной фазы.

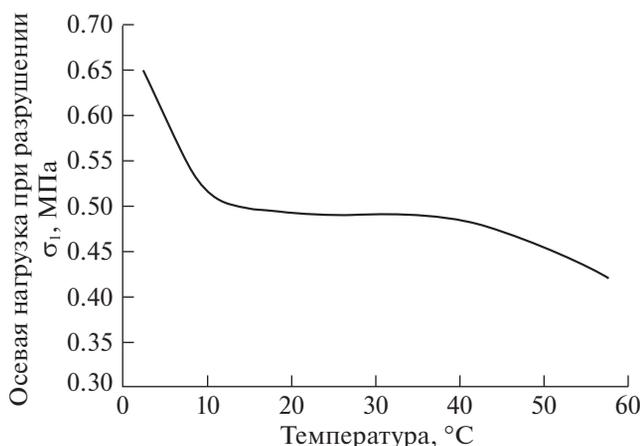


Рис. 3. Зависимость величины осевой нагрузки σ_1 при разрушении легких глин от температуры при испытаниях в условиях трехосного сжатия по консолидировано-недренированной схеме. Объемное давление $\sigma_v = 0.1$ МПа.

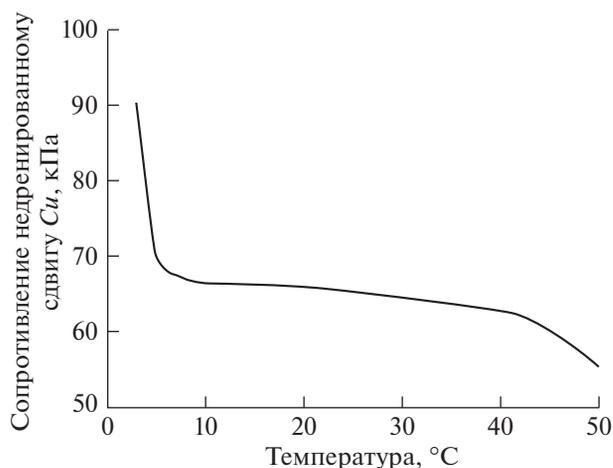


Рис. 4. Зависимость величины сопротивления недренированному сдвигу (C_u) легких глин от температуры при испытаниях микрочувствительной.

Основную роль в строении и свойствах связанных дисперсных грунтов играют физико-химические структурные связи, образующиеся на границе минеральных частиц с водой в результате действия молекулярных, ионно-электростатических сил, расклинивающего действия гидратных пленок и капиллярных сил.

Молекулярные силы (называемые также ван-дер-ваальсовскими) оказывают важнейшее влияние на формирование в процессе коагуляции и седиментации таких высокодисперсных систем, как слабосцементированные глины и илы. Ионно-электростатические силы действуют при электростатическом притяжении отрицательно заряженных частиц и расположенных между ними катионов. При сближении минеральных частиц, окруженных слоем ДЭС, происходит перекрытие их диффузных слоев, и возникает электростатическое взаимодействие одноименно заряженных ионов адсорбционных и диффузных слоев.

Действие структурных сил гидратных пленок проявляется при сближении частиц и перекрытии их ДЭС. При этом происходит поджатие пленок, в результате чего часть воды теряет связь с частицами в зоне их контакта и переходит в свободную фазу. Особая структура воды в зоне перекрытия разрушается, что сопровождается изменением ее энергетического состояния и возникновением отталкивающих сил между частицами. Это явление было открыто и изучалось Б.В. Дерягиным [4, 6] и представителями его научной школы [2, 3, 5, 7] и получило название расклинивающего действия гидратных пленок. Расклинивающее давление возникает в результате суммарного действия сил притяжения и отталкивания между частицами. Его величина зависит от степени перекрытия гидратных пленок взаимодействующих частиц и может быть, как положительной, так и отрицательной.

В результате взаимодействия частиц и их гидратных пленок происходит образование структурных контактов между минеральными частицами. В дисперсных глинистых грунтах различают три типа контактов — дальний коагуляционный, ближний коагуляционный и переходный точечный, каждый из которых формируется на определенной стадии литогенеза. Преобладание определенного типа контактов в структуре глинистых пород определяет их физико-химическое состояние (текучее, пластичное или твердое), строение и свойства.

Площадки контактов являются зонами, на которых концентрируются напряжения, передаваемые на грунт. Каждый из типов контактов имеет свою предельную прочность, определяемую силой взаимодействия между частицами и расклинивающим действием гидратных пленок. Эта прочность определяется как реальная эффектив-

ная прочность σ'' . Величина σ'' зависит от общего эффективного давления в грунте σ' , количества и площади контактов и расклинивающего действия гидратных пленок $\Pi(h)$. Прочность контакта зависит от минералогического состава частиц и его типа, определяемого толщиной и свойствами гидратной пленки на поверхности частиц. В условиях, при которых напряжение, передаваемое на площадку контакта, превышает его прочность, происходит разрушение последнего, соответственно, общая реальная эффективная прочность глины определяется суммарной прочностью отдельных контактов.

Таким образом общая эффективная прочность полностью водонасыщенных глин, в которых не действуют капиллярные силы, определяется их реальной эффективной прочностью и расклинивающим давлением гидратных пленок. Реальная эффективная прочность — постоянная величина, характерная для каждого конкретного грунта, определяется типом контакта и минеральным составом частиц и остается неизменной вне зависимости от условий, в которых находится грунт.

Толщина и свойства гидратных пленок, а, следовательно, величина их давления, могут изменяться в зависимости от условий нагружения. Гидратные пленки имеют двухслойное строение и состоят из адсорбционного (α -пленка) и диффузного (β -пленка) слоев. Величина общего давления гидратных пленок складывается, согласно Б.В. Дерягину и Н.В. Чураеву [7], из действия электростатической, молекулярной и структурной составляющих. Толщина и устойчивость β -пленок определяются действием электростатической компоненты расклинивающего давления, поэтому она метастабильна и может в определенных условиях терять связь с минеральными частицами и переходить в свободную воду. Расклинивающее давление β -пленки определяется ее устойчивостью и зависит от ее толщины [8]. График этой зависимости показан на рис. 5.

В отличие от β -пленок, α -пленки более стабильны, хотя их толщина также может изменяться под действием различных факторов. Толщина и устойчивость α -пленок определяются действием молекулярной и структурной компонент расклинивающего давления. Величина давления α -пленок в большей степени, чем для β -пленок, зависит от толщины пленки [7], при этом толщина α -пленок зависит от температуры [9, 15], вид этой зависимости показан на рис. 6.

В целом, величина давления гидратных пленок, как β -пленок, так и α -пленок, определяется их толщиной. Действие температуры оказывает влияние на толщину пленок и, следовательно, величину расклинивающего давления. При изменении температуры вода гидратных пленок может терять связь с минеральными частицами и пере-

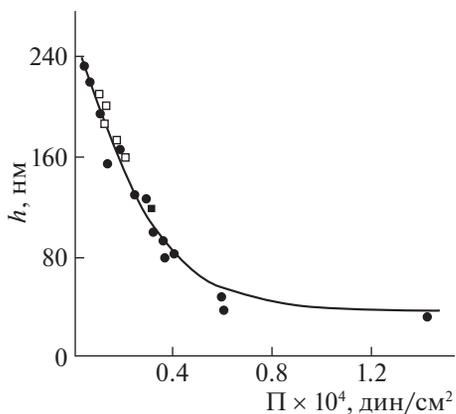


Рис. 5. Изотерма расклинивающего давления β -пленок воды на поверхности стекла, кварца и слюды [8].

ходить в свободную воду, что приводит к изменению общих эффективных напряжений в глинах. Для изучения причин и закономерностей влияния температуры на прочность глинистых грунтов необходимо экспериментально определить зависимость величины расклинивающего давления гидратных пленок в глинистых грунтах от температуры.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения расклинивающего давления гидратных пленок глинистых грунтов авторами разработана, обоснована и применена специальная методика исследований. Эта методика описана ранее [10], ее сущность заключается в определении давления набухания грунта и последующего расчета величины расклинивающего давления. Такая методика в общем случае позволяет успешно исследовать давление гидратных пленок, однако ее применение в изменяющихся температурных условиях осложняется, а при испытаниях в условиях отрицательных температур невозможно из-за того, что свободная вода в грунтах при этом находится в мерзлом фазовом состоянии.

В связи с этим, для исследования давления гидратных пленок глин авторами применялась методика определения общих и реальных эффективных напряжений, разработанная и успешно опробованная при выполнении предыдущих работ. Эта методика и результаты определения на ее основе общих и реальных эффективных напряжений для разновидностей глинистых грунтов описана авторами в [11, 12]. Сущность ее заключается в том, что испытания грунтов проводятся в условиях, при которых воздействие внешних нагрузок производится только на сами контакты, при этом энергия на изменение объема испытываемого грунта, его уплотнение, разрушение, разрыв сплошности и т.п. не расходуется, а все нагрузки,

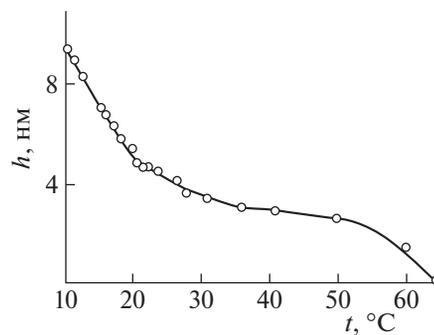


Рис. 6. Температурная зависимость толщины α -пленки воды на кварце [9, 15].

возникающие в грунте при испытании, равномерно распределяются во всей зоне их действия.

Таким условиям наилучшим образом соответствуют условия испытаний по методу чистого сдвига (скашивания). На основе полученных данных расчетным путем определяют общее предельное эффективное напряжение σ' , равное сумме касательного (τ) и нормального (σ_1) напряжений в момент разрушения структурных связей в образце за вычетом порового давления (σ_w), а также реальное эффективное напряжение σ'' , как разницу общего напряжения σ' и расклинивающего давления гидратных пленок $P(h)$. Как уже было сказано выше, величина σ'' зависит от типа контакта и минералогического состава частиц и постоянна для каждого грунта. Величина $P(h)$ может изменяться в зависимости от температурных условий. Соответственно, испытания методом скашивания, проведенные при различных температурных условиях, позволяют установить закономерности изменения величины $P(h)$.

Для проведения испытаний образцы грунтов естественного сложения или модельных грунтов помещаются в прибор скашивания, размещенный в термокамере, после чего проводятся испытания при заданной температуре в диапазоне от -5°C до $+65^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изложенные выше научные положения о строении и свойствах глинистых грунтов и результаты проведенных ранее практических испытаний [11, 12] определили основные направления экспериментальных исследований.

Изменение толщины гидратных пленок и, соответственно, величины их давления обуславливает реакцию глинистых грунтов на температурное воздействие. Следовательно, для исследования этого фактора и возможности разработки прогноза изменения прочности глин при меняющихся температурах необходимо охарактеризо-

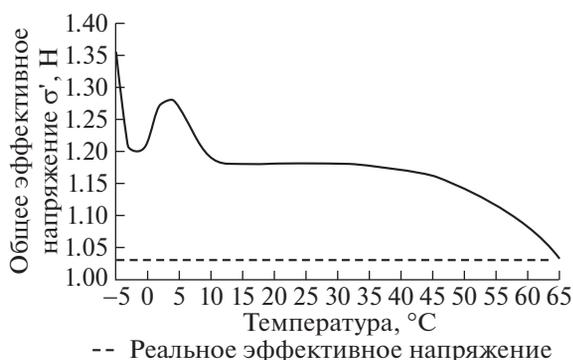
Таблица 1. Реальная эффективная прочность контактов исследованных грунтов московской морены

Реальная эффективная прочность единичного контакта преобладающего типа, Н		
переходного точечного	ближнего коагуляционного	дальнего коагуляционного
$1.4 \cdot 10^{-9}$	$3.1 \cdot 10^{-10}$	$4.3 \cdot 10^{-11}$

вать закономерности изменения величины расклинивающего давления гидратных пленок $\Pi(h)$. Исследования проводились на образцах глинистых грунтов естественного сложения и искусственно приготовленных образцах разновидностей глинистых моренных грунтов (gIms) Московского региона различной консистенции (I_L). В их состав входят терригенная, представленная кварцем и полевыми шпатами, и глинистая, сложенная преимущественно иллитом и в меньших количествах каолинитом, составляющие. В незначительном количестве в составе глинистой фракции присутствуют смектиты. Наибольшее количество терригенной составляющей характерно для супесей, для легкой глины ее содержание минимально.

Для испытаний использовались образцы полностью водонасыщенных грунтов, чтобы исключить действие капиллярных сил в процессе испытаний. Предварительная подготовка образцов к проведению испытаний включала этап их консолидации.

Ранее авторами уже были получены характеристики реальной эффективной прочности преобладающих типов контактов в структуре описанных разновидностей глинистых грунтов. Эти данные, приведенные в табл. 1, послужили основой исследований.

**Рис. 7.** Характерный график зависимости общих эффективных напряжений σ' при разрушении контактов в единичном объеме грунта от изменения температуры (на примере тяжелых суглинков).

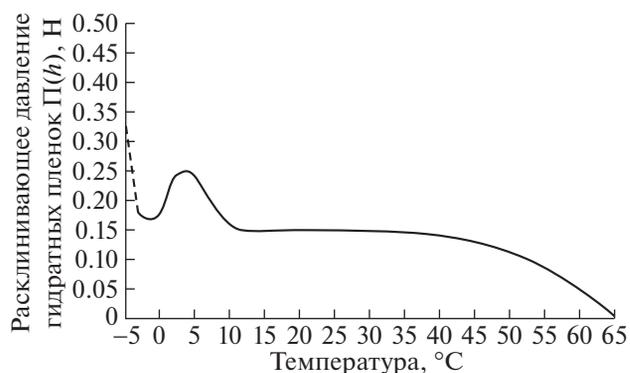
На основании этих данных и данных о количестве единичных контактов в грунтах [12] рассчитываются реальные эффективные напряжения при разрушении контактов в единичном объеме грунта σ'' для каждого преобладающего типа контакта.

По результатам испытаний методом сжатия в исследованных грунтах были определены общие эффективные напряжения σ' при разрушении контактов в единичном объеме грунта при различных температурах. Характерный график зависимости σ' от изменения температуры показан на рис. 7.

Характер изменения величины σ' от температуры аналогичен показанной выше закономерности изменения прочности глинистых грунтов (см. рис. 3 и 4), а также толщины и давления гидратных пленок от температуры (см. рис. 5 и 6). Это подтверждает высказанное выше положение, что изменение прочности связных дисперсных грунтов при воздействии температуры обусловлено изменением строения и величины расклинивающего давления гидратных пленок в этих условиях.

Разница между значениями σ'' и σ' в каждом экспериментальном испытании составляет величину расклинивающего давления гидратных пленок $\Pi(h)$ в единичном объеме грунта при температуре его проведения. Результаты расчетов для преобладающего типа контакта в структуре грунта представлены в табл. 2. Характерный график зависимости величины расклинивающего давления гидратных пленок от изменения температуры показан на рис. 8.

Наиболее активно влияние температуры проявляется для грунтов в твердом физико-химическом состоянии, в строении которых преобладают переходные точечные контакты [11]. Для таких грунтов характерно наиболее высокое расклинивающее давление гидратных пленок [10]. Для грунтов в пластичном физико-химическом состоянии, строение которых определяется преоб-

**Рис. 8.** Характерный график зависимости величины расклинивающего давления гидратных пленок $\Pi(h)$ от изменения температуры.

ладающими ближними коагуляционными контактами, изменения величины давления пленок воды проявляются значительно менее активно, а для текучих грунтов с преобладающими дальними коагуляционными контактами, расклинивающее давление гидратных пленок которых минимально, его изменение при температурном воздействии практически не проявляется.

Результаты проведенных исследований характеризуют реакцию гидратных пленок частиц в глинах на изменение температурных условий в области как положительных, так и отрицательных значений температур. При положительных температурах наибольшее давление гидратных пленок возникает в интервале от 0°C до +4°C. Очевидно, это связано с особыми свойствами, присущими воде в таких условиях (повышенная плотность и вязкость).

При повышении температуры до значений +10°C...+15°C давление пленок воды постепенно снижается и остается практически постоянным до температур +40°C...+45°C. В этих условиях гидратные пленки частиц, адсорбционный и диффузный слои находятся в стабильном состоянии, их толщина и, соответственно, давление, имеют неизменные значения, характерные для каждого грунта и типа контактов, преобладающих в его микроструктурном строении.

При дальнейшем повышении температуры происходит разрушение гидратных пленок, в первую очередь β -пленок, а впоследствии и α -пленок, что приводит к снижению величины их расклинивающего давления. Снижение продолжается до достижения температуры +65°C, при которой практически полностью разрушаются α -пленки (см. рис. 6), и общее эффективное напряжение в грунте практически сравнивается с реальным эффективным напряжением. Разрушение пленок заключается в постепенной, начиная с внешних слоев, потери связи молекул воды с минеральными частицами и переходе связанной воды в свободную, что подтверждается изменением величины порового давления, показанного на рис. 9, резко возрастающего в этих условиях.

При отрицательных температурах изменение давления гидратных пленок носит иной характер. В интервале температур от 0°C до -4°C расклинивающее давление остается постоянным, и его величина соответствует аналогичным значениям в диапазоне от +10°C до +40°C. Это показывает, что в этом диапазоне отрицательных температур до -4°C гидратные пленки также находятся в стабильном состоянии, их строение и свойства не изменяются. При снижении температуры ниже -5°C происходит замерзание воды гидратных пленок, что приводит к резкому увеличению величины общего эффективного напряжения при разрушении грунта.

Таблица 2. Величина расклинивающего давления гидратных пленок в грунтах московской морены с различным преобладающим типом контактов

Температура, °C	Величина расклинивающего давления гидратных пленок в единичном объеме грунтов с преобладающим типом контактов $P(h)$, Н		
	переходный точечный	ближний коагуляционный	дальний коагуляционный
-5	2.21	0.70	0.498
-3	1.21	0.28	0.047
-2	1.20	0.28	0.046
-1	1.20	0.28	0.046
0	1.21	0.28	0.046
+1	1.24	0.29	0.046
+2	1.27	0.30	0.048
+4	1.28	0.32	0.048
+5	1.27	0.27	0.048
+10	1.19	0.27	0.046
+15	1.18	0.27	0.046
+20	1.18	0.27	0.046
+30	1.18	0.27	0.046
+40	1.17	0.27	0.045
+45	1.16	0.27	0.044
+50	1.14	0.26	0.043
+55	1.12	0.26	0.042
+60	1.08	0.25	0.041
+65	1.03	0.24	0.040

Такие изменения свойств гидратных пленок может быть связано с изменением строения их диффузных слоев. В рассмотренном диапазоне отрицательных температур, характерном для многолетнемерзлых пород в естественном залега-

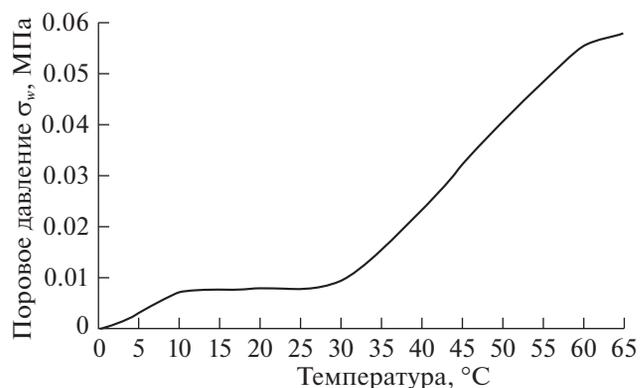


Рис. 9. Характерный график зависимости величины порового давления σ_w от изменения температуры.

нии, адсорбционные слои не меняют своего строения, так как вода в них не замерзает даже при температурах ниже -10°C [1]. Согласно полученным данным, при температурах от -5°C до 0°C вода β -пленок также находится в жидком фазовом состоянии, и величина их расклинивающего давления сопоставима со значениями в области положительных температур $+10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$. В таких условиях, при повышении температуры выше -5°C , в мерзлых грунтах может происходить выделение газов, содержащихся в диффузных слоях гидратных пленок частиц, приводящее к снижению их прочности [16], при том, что свободная вода в этих условиях остается замерзшей.

С позиций оценки структурных преобразований в грунтах при флуктуациях температур можно отметить следующее.

В условиях действия высоких положительных температур, при которых в глинах происходит практически полное разрушение гидратных пленок, появляются предпосылки изменений их структуры, характерные для их постседиментационных преобразований на стадии среднего и позднего катагенеза. На этой стадии литогенеза происходит формирование устойчивых необратимых фазовых контактов между частицами и преобразование дисперсных глин в скальные грунты – аргиллиты. Это положение было изучено на примере глин сочинской свиты $P_3\text{сщ}$. Такие глины, в силу историко-геологических особенностей их формирования, обладают специфическими свойствами, в первую очередь, способностью к активной гидратации при контакте с водой [18, 19]. За счет особенностей минерального состава сносимого материала, седиментогенеза и катагенеза под воздействием высокого геостатического давления при температурах, не превышавших 60°C в условиях опресненного водоема, в них образовывались не цементационные фазовые контакты, характерные для аргиллитов, а переходные контакты ионно-электростатического типа [14, 18], что определило специфические свойства данных грунтов. Глины сочинской свиты отличаются высокой гидрофильностью, при контакте с водой они активно набухают (по результатам экспериментальных исследований величина давления набухания достигает 0.17 МПа), что приводит к существенному снижению их прочности и, в следствие этого, к многочисленным авариям при строительном освоении.

Грунты испытывались действием различных нагрузок при разных температурах, после чего исследовалось изменение их свойств. Было определено, что после длительного воздействия нагрузки в 1.1 МПа при температуре $+65^{\circ}\text{C}$ грунты теряли способность к гидратации и становились практически ненабухаемыми. Это может быть объяснено тем, что в таких условиях происходит разрушение диффузных и адсорбционных слоев

гидратных пленок частиц, под действием внешних нагрузок минеральные частицы сближаются, и в этих условиях между ними начинают формироваться новые необратимые фазовые контакты.

ВЫВОДЫ

Результаты выполненных исследований показывают, что температурные условия являются важным фактором, влияющим на прочность глинистых грунтов. Изучение этого вопроса возможно с позиций физико-химической теории прочности грунтов, рассматривающей их внутреннее строение и взаимодействие между компонентами дисперсной фазы и дисперсионной среды. Изменение прочности глин при действии температурного фактора обусловлено свойствами гидратных пленок минеральных частиц. При вариациях температуры меняется строение, толщина и свойства гидратных пленок, баланс сил взаимодействия между частицами, что приводит к изменению свойств грунтов в целом, в том числе прочностных свойств.

Гидратные пленки минеральных частиц в глинистых грунтах в естественных условиях состоят из двух слоев – адсорбционного (α -пленки) и диффузного (β -пленки). При температурах выше $+40^{\circ}\text{C}$ начинается постепенное разрушение гидратных пленок, в первую очередь β -пленок, а впоследствии и α -пленок, вода из которых переходит в свободную воду. Разрушение гидратных пленок продолжается до достижения температуры $+65^{\circ}\text{C}$. В таких условиях возникают предпосылки для катагенетических изменений строения глин, которые могут происходить при одновременном действии внешних нагрузок, что приводит к преобразованию дисперсных глин в скальные грунты – аргиллиты.

Воздействие отрицательных температур также оказывает влияние на строение и свойства гидратных пленок. Наиболее сильно оно проявляется в условиях повышенных отрицательных температур, характерных для многолетнемерзлых грунтов в современных климатических условиях. При температуре выше -5°C вода β -пленок находится в жидком фазовом состоянии, а их строение и свойства аналогичны тем, которыми они обладают при положительных температурах. Это может вызывать изменения строения и свойств мерзлых грунтов при повышении температуры в указанном диапазоне при сохранении общего мерзлого фазового состояния свободной воды и грунтов в целом.

Наибольшее влияние изменение температуры оказывает на строение и свойства гидратных пленок в твердых грунтах, для пластичных грунтов оно сказывается существенно меньшим и практически не проявляется в текучих грунтах, что связано с типом контактов минеральных частиц,

преобладающих в грунтах в каждом физико-химическом состоянии.

Затронутые вопросы требуют особого внимания и дальнейшего изучения для разработки объективного и достоверного прогноза изменения свойств связных дисперсных грунтов в различных температурных условиях.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. АААА-А19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананян А.А.* Оценка средней толщины пленок воды в талых и мерзлых тонкодисперсных горных породах // Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 106–113.
2. *Дерягин Б.В., Обухов Е.В.* Аномальные свойства тонких слоев жидкости // Коллоидный журнал. 1935. Т. 1. Вып. 5. С. 385–398.
3. *Дерягин Б.В., Кусаков М.М.* Экспериментальное исследование сольватации поверхностей // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1937. № 5. С. 1119–1152.
4. *Дерягин Б.В.* Теория гетерокоагуляции, взаимодействия и слипания разнородных частиц в растворах электролитов // Коллоидный журнал. 1954. Т. 16. № 6. С. 425–438.
5. *Дерягин Б.В., Нерпин С.В.* Равновесие, устойчивость и кинетика свободных пленок жидкости // Докл. АН СССР. 1954. Т. 99. № 6. С. 1029–1032.
6. *Дерягин Б.В.* Устойчивость коллоидных систем // Успехи химии. 1979. Т. 48. № 4. С. 675–721.
7. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В.* Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 137 с.
8. *Дерягин Б.В.* Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 205 с.
9. *Ершова Г.Ф., Зорин З.М., Чураев Н.В.* Температурная зависимость толщины полимолекулярных адсорбционных слоев воды на поверхности кварца // Коллоидный журнал. 1975. Т. 37. № 1. С. 208–210.
10. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г.* Влияние расклинивающего действия гидратных пленок на прочностные свойства глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 4. С. 91–97.
11. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66–72.
12. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60.
13. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИГЭ РАН, 2012. 74 с.
14. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
15. *Перевертаев В.Д., Мецик М.С.* Исследование адсорбции паров воды на поверхности кристаллов слюды // Коллоидный журн. 1966. Т. 28. № 2. С. 254–259.
16. *Собин Р.Г., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н.* Влияние газовой компоненты на свойства мерзлых грунтов и динамика ее выделения при изменении температуры // Сергеевские чтения. Геоэкологические аспекты реализации национального проекта “Экология”. Диалог поколений. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: РУДН, 2020. С. 204–210.
17. *Хименков А.Н., Кошурников А.В., Карпенко Ф.С. и др.* О фильтрации газов в многолетнемерзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 16–38.
18. *Хмелевцов А.А.* Инженерно-геологические свойства аргиллитоподобных глин сочинской свиты и их влияние на условия строительства в городе Сочи: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-на-Дону, 2014. 33 с.
19. *Хмелевцов А.А., Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г.* Особенности строения и физико-химических свойств аргиллитоподобных глин сочинской свиты в связи с условиями их образования // Сергеевские чтения. Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 145–149.
20. *Чувиллин Е.М., Перлова Е.В.* Формы нахождения и условия формирования газовой компоненты мерзлых пород // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 1999. № 5. С. 55–57.

THE INFLUENCE OF VARIATIONS IN HYDRATE FILM PROPERTIES ON THE STRENGTH OF CLAY SOILS UPON THERMAL IMPACTS

F. S. Karpenko^{a,#}, V. N. Kutergin^a, S. I. Frolov^a, and R. V. Sobin^a

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

[#] *E-mail: kafs08@bk.ru*

Changes in soil strength under the influence of temperature affect soil stability and safety of construction and operation of engineering structures. The need to adapt to such changes and reduce their adverse impact requires the development of a method for reliable and objective prediction of changes in the strength properties of soils at different temperatures. The problem of changing the strength properties of clay soils under temperature influence are considered from the viewpoint of physical and chemical mechanics. It is shown that the reaction of coherent dispersed soils to temperature influence is determined by the properties of hydrate films of soil-composing mineral particles. During temperature fluctuations, water of hydrate films may lose its

connection with particles and pass to free water. Changing thickness of hydrate films changes their splitting pressure, disturbing the balance of particle interaction forces, which affects the soil strength as a whole.

Keywords: clay soils, structural contacts, α - and β -films, disjoining pressure of hydrate films, general effective stresses, actual effective stresses

REFERENCES

- Ananyan, A.A. *Otsenka srednei tolshchiny plenok vody v talykh i merzlykh tonkodispersnykh gornykh porodakh* [Estimation of average thickness of water films in thawed and frozen fine-dispersed soils]. *Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh*. Moscow, MGU Publ., 1972, vol. 2, pp. 106–113. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Obukhov, E.V. *Anomal'nye svoystva tonkikh sloev zhidkosti* [Anomaly properties of thin liquid layers]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1935, vol. 1, is. 5, pp. 385–398. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Kusakov, M.M. *Ekspperimental'noe issledovanie sol'vatatsii poverkhnostei* [Experimental investigation of surface solvation]. *Izv. AN SSSR, Ser. Khim.*, 1937, no. 5, pp. 1119–1152. (in Russian)
- Deryagin, B.V. *Teoriya geterokoagulyatsii, vzaimodeistviya i slipanaiya raznorodnykh chastits v rastvorakh elektrolitov* [Theory of heterocoagulation, interaction and adhesion of dissimilar particles in electrolyte solutions]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1954, vol. 16, no. 6, pp. 425–438. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Nerpin, S.V. *Ravnovesie, ustoychivost' i kinetika svobodnykh plenok zhidkosti* [Equilibrium, stability and kinetics of free liquid films]. *Dokl. AN SSSR*, 1954, vol. 99, no. 6, pp. 1029–1032. (in Russian)
- Deryagin, B.V. *Ustoychivost' kolloidnykh sistem* [Stability of colloidal systems]. *Uspekhi khimii*, 1979, vol. 48, no. 4, pp. 675–721. (in Russian)
- Deryagin, B.V., Churaev, N.V. *Smachivayushchie plenki* [Wetting films]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 137 p. (in Russian)
- Deryagin, B.V. *Teoriya ustoychivosti kolloidov i tonkikh plenok* [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 205 p. (in Russian)
- Ershova, G.F., Zorin, Z.M., Churaev, N.V. *Temperaturnaya zavisimost' tolshchiny polimolekulyarnykh adsorbtsionnykh sloev vody na poverkhnosti kvartsa* [Temperature dependence of the thickness of polymolecular adsorption water layers on the quartz surface]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1975, vol. 37, no. 1, pp. 208–210. (in Russian)
- Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. *Vliyaniye rasklinivayushchego deystviya gidratnykh plenok na prochnostnye svoystva glinistykh gruntov* [Influence of the disjoining effect of hydrate films on the strength properties of clay soils]. *Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 91–97. (in Russian)
- Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda predelov plastichnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil plasticity limits]. *Geoekologiya*, 2018, no. 5, pp. 66–72. (in Russian)
- Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. (in Russian)
- Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IGE RAN. 2012, 74 p. (in Russian)
- Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoystva. Sostav, stroeniye i formirovaniye svoystv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ. 2013. 576 p. (in Russian)
- Perevertaev, V.D., Metsik, M.S. *Issledovaniye adsorbtsii parov vody na poverkhnosti kristallov slyudy* [Investigation of water vapor adsorption on the surface of mica crystals]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1966, vol. 28, no. 2, pp. 254–259. (in Russian)
- Sobin, R.V., Karpenko, F.S., Kutergin, V.N. Influence of the gas component on the properties of frozen soils and dynamics of its release when temperature changes. *Sergeevskie chteniya. Geoekologicheskiye aspekty realizatsii natsional'nogo proyekta Ekologiya. Dialog pokolenii*. [Proc. of the 22nd scientific conference in commemoration of academician E.M. Sergeev on the topic "Geoecological aspects of the implementation of the national project Ecology. Dialogue of Generations"]. Vol. 22, Moscow, 2020, pp. 204–210. (in Russian)
- Khimenkov, A.N., Koshurnikov, A.V., Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Gagarin, V.E., Sobolev, P.A. *O fil'tratsii gazov v mnogoltemerzlykh porodakh v svete problemy degazatsii litosfery Zemli i formirovaniya estestvennykh vzryvnykh protsessov v kriolitozone* [On gas filtration in permafrost rocks in the context of the Earth's lithosphere degassing and the formation of natural explosive processes in the permafrost zone]. *Arktika i Antarktika*, 2019, no. 3, pp. 16–38. (in Russian)
- Khmelevtsov, A.A. *Inzhenerno-geologicheskie svoystva argillitopodobnykh glin sochinskoi svity i ikh vliyaniye na usloviya stroitel'stva v gorode Sochi* [Engineering and geological properties of mud-like clays of the Sochi formation and their influence on construction conditions in Sochi]. Extended Abstract of Cand. (Geol.-Min.) Dissertation, Rostov-on-Don. 2014. 33 p. (in Russian)
- Khmelevtsov, A.A., Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G. Features of the structure and physical and chemical properties of mud-like clays of the Sochi formation in connection with the conditions of their formation. *Sergeevskie chteniya. Razvitiye nauchnykh idei akademika E.M. Sergeeva na sovremennom etape*. [Proc. of the 16th scientific conference in commemoration of academician E.M. Sergeev on the topic "Development of scientific ideas of academician Sergeev at the present stage"]. Vol. 16. Moscow, 2014, pp. 145–149. (in Russian)
- Chuvilin, E.M., Perlova, E.V. *Formy nakhozhdeniya i usloviya formirovaniya gazovoi komponenty merzlykh porod* [Forms of occurrence and formation conditions of the gas component in frozen rocks]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 1999, no. 5, pp. 55–57. (in Russian)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 631.423

ФОНОВЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ БАССЕЙНА РЕКИ ПОДКАМЕННАЯ ТУНГУСКА

© 2021 г. А. Р. Митев^{1,*}, Р. А. Шарафутдинов^{2,**}

¹ Проектный институт ООО “РН-КрасноярскНИПИнефть”, ул. 9 мая, д. 65д, Красноярск, 660098 Россия

² Институт экологии и географии Сибирского федерального университета,
пр. Свободы, д. 79, Красноярск, 660041 Россия

*E-mail: MitevAR@knipi.rosneft.ru

**E-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 22.10.2020 г.

После доработки 10.12.2020 г.

Принята к публикации 25.12.2020 г.

В работе обобщаются результаты многолетних геоэкологических исследований почвенного покрова, формирующегося в пределах водосборного бассейна верхнего течения р. Подкаменная тунгуска. Проведена статистическая обработка полученной информации, определены концентрации нефтепродуктов, тяжелых металлов и металлоидов, которые предложено считать фоновыми для почв данной территории. Общий объем выборки – 456 проб. Сведения приводятся для верхнего 20-сантиметрового почвенного слоя, выполняющего наиболее выраженную интегральную экологическую функцию и в первую очередь подвергающемуся негативным физическим и химическим воздействиям в результате хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: почвы, фоновые концентрации, тяжелые металлы, Средняя Сибирь, Подкаменная Тунгуска, среднетаежный ландшафт, рН(солевой), ртуть (Hg), свинец (Pb), цинк (Zn), мышьяк (As), кадмий (Cd), никель (Ni), медь (Cu), нефтепродукты, хлориды, сульфаты

DOI: 10.31857/S0869780921010100

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный покров южной Эвенкии до сегодняшнего дня остается сравнительно слабо изученным. В последнее десятилетие он подвержен возрастающему действию негативных процессов, связанных с расширением хозяйственной деятельности.

На площади водосборного бассейна р. Подкаменная Тунгуска активно ведется разведка полезных ископаемых, проводятся лесозаготовительные мероприятия, осуществляется транспортировка различных грузов (включая опасные), в том числе по зимникам – сезонным дорогам без твердого покрытия, проходящим в пределах водохранных зон водных объектов. Указанная выше деятельность сопряжена с риском негативного воздействия на окружающую среду.

Контроль степени техногенной нагрузки и степени воздействия хозяйственной деятельности предполагает знание уровня состояния компонента окружающей среды, колебание которого на определенную величину является свидетельством изменения качественного и/или количественного состояния указанного компонента окружающей среды. Применительно к почвенно-

му покрову, большая часть методик оценки и контроля изменений его состояния за такой уровень принимают фоновое содержание веществ в почве (в том числе загрязняющих). Несмотря на некоторые разночтения в определении данного термина, его смысловую нагрузку можно свести к следующему определению.

Фоновое содержание (фоновая концентрация) веществ в почвах – содержание химических веществ в почвах, не испытывающих заметного антропогенного воздействия [13, 10], соответствующее их естественным (природным) концентрациям [4, 5], зависящее от различий почвенно-климатических зон и их геологических и почвообразующих условий [15].

Несмотря на то, что [15] предписывает рассчитывать фоновую концентрацию как среднее, ссылаясь на п. 3.8 отмененного в 2005 г. ISO 11074-1-96, следует отметить, что специализированный ISO 19258-2018 [17] определяет фоновое значение как статистическую характеристику общего содержания веществ в почве, которое может выражаться в терминах среднего значения, медианы или диапазона значений в зависимости от масштаба и задачи исследования.

Таким образом, в рамках настоящей работы анализируется фоновое содержание веществ (тяжелые металлы, хлориды, сульфаты, натрий, нефтепродукты) в почвах, формирующихся в пределах площади водосборного бассейна Подкаменной Тунгуски в верхнем ее течении. Выбор анализируемых компонентов в основном обусловлен требованиями п. 6.4. СанПиН 2.1.7.1287-03¹.

РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследования расположен в пределах Западного траппового плато и Центрально-Тунгусской впадины [3] (рис. 1). Рельеф Центрально-Тунгусской впадины представляет собой волнистую равнину, слабовсхолмленную, с выровненными водораздельными пространствами, сглаженными пологими склонами и с хорошо выработанными, широкими заболоченными долинами рек и ручьев [1].

В пределах Западного траппового плато особенности рельефа обусловлены широким развитием пластовых интрузий траппов. Долины рек здесь узкие, глубоковрезанные, характерны наклонные поймы, пороги. Интрузивные породы, как наиболее устойчивые к процессам денудации, занимают господствующие гипсометрические уровни и образуют гребневидные хребты и гривы.

Распространение многолетнемерзлых толщ островное, сугубо локальное. Мерзлые породы чаще выявляются летом в аллювиальных и торфяных отложениях, которые протаивают относительно неглубоко. Бугристые торфяники встречаются в северной части района в заболоченных долинах рек Хемур, Хонгон. На таких участках можно наблюдать разреживающиеся эпигенетические ледяные решетки в подстилающих торфозерных суглинках.

Район относится к среднетаежной ландшафтной зоне Средней Сибири. По лесорастительному районированию территория района исследований относится к Подкаменно-Тунгусскому округу Ангаро-Тунгусской провинции Средне-Сибирской плоскогорной лесорастительной области среднетаежных лиственничных и сосновых лесов [9], лесистость территории достигает 73%.

Основные лесобразующие породы — сосна обыкновенная, лиственница Чекановского, лиственница сибирская. Доминируют кустарничково-зеленомошная, травяно-кустарничковая, толокнянковая, кустарничково-зеленомошная, лишайниковая группы светлохвойных лесов.

Среди заболоченных лесов наибольшее распространение имеют березовые леса и мелколе-

ся из березы пушистой: кустарничково-осоково-политриховые, кустарничково-моховые и кустарничково-ерниково-осоково-вейниковые.

По почвенно-географическому районированию район исследований находится на стыке Приенисейской горной и Средне-Сибирской почвенных провинций Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной почвенно-биоклиматической области [11]. В структуре почвенного покрова на водораздельных пространствах основная роль принадлежит дерново-подзолистым слабооподзоленным (Umbric Podzols) почвам, подбуграм грубогумусовым и иллювиально-железистым (Histic Phaeozem), а в пределах речных долин — аллювиальным серогумусовым типичным и глееватым (Dystric Fluvisols), слоисто-аллювиальным гумусовым (Leptic Fluvisols), аллювиальным торфяно-глеевым (Histic Fluvisols Охуауаки), а также торфяным эутрофным почвам (Histosols Sapric).

Учитывая рандомизированную структуру сети пробоотбора в пределах района исследования, отобранные в рамках настоящей работы пробы характеризуют:

— почвы структурно-метаморфического, текстурно-дифференцированного, криометаморфического, альфегумусового, железисто-метаморфического отделов постлитогенного ствола почвообразования;

— почвы аллювиального отдела синлитогенного ствола почвообразования

МЕТОДИКА ОПРОБОВАНИЯ И АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробоотбор осуществлен по нерегулярной сети опробования в период с 2010 по 2019 г. Каждый пункт отбора проб представляет собой пробную площадку, характеризующую элементарный природный ландшафт. На каждой площадке проводилось морфологическое описание почвы и отбиралось по пять единичных проб методом конверта из поверхностного горизонта (0–20 см). Объединенная проба высушивалась до воздушно-сухого состояния, упаковывалась и направлялась в лабораторный стационар. Часть объединенной пробы, предназначенная для определения нефтепродуктов, помещалась в стеклянный флакон с притертой пробкой. Каждая проба сопровождалась этикеткой, содержащей шифр пробы без географической и иной привязки к месту отбора. Местоположение пробной площади фиксировалось с помощью GPS/ГЛОНАСС в полевом журнале.

Отобранные пробы передавались в лабораторные стационары, аккредитованные в установленном порядке. Анализ проводился в лаборатории филиала ЦЛАТИ по Енисейскому региону и ГПКК “КНИИГиМС”. рН(солевой) определялся

¹ СанПиН 2.1.7.1287-03 Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. (с изменениями на 25 апреля 2007 года) URL: <http://docs.cntd.ru/document/901859456>

Таблица 1. Основные статистики выборки фоновых проб

Статистика	pH (KCl), ед.	Hg	Pb	Zn	As	Cd	Ni	Cu	НП*	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Среднее, кг/кг	5.63	0.03	8.08	57.88	4.07	0.71	33.30	31.35	242.71	29.86	21.01	26.28
Стандартная ошибка, кг/кг	0.09	0.00	0.71	5.77	0.29	0.09	2.75	3.32	35.31	2.43	2.94	3.07
Медиана, г/кг	5.70	0.02	6.50	53.00	3.00	0.33	30.00	24.10	115.50	21.00	10.00	17.00
Мода, кг/кг	4.90	0.01	10.00	37.00	2.50	0.40	24.00	22.00	25.00	5.00	13.00	15.00
Стандартное отклонение, кг/кг	1.22	0.03	10.30	75.68	3.94	0.97	39.81	48.01	509.18	31.54	38.95	40.09
Дисперсия выборки	1.48	0.00	106.19	5727.64	15.4	0.95	1584.83	2305	259263	994.69	1516.8	1607.12
Экссесс	-1.14	11.16	51.17	142.42	2.82	5.51	148.8	146.3	82.36	18.71	32.64	53.48
Асимметричность	-0.13	2.63	6.09	11.41	1.83	2.43	11.29	11.18	7.96	3.62	5.36	6.54
Минимум, кг/кг	2.60	0.00	0.20	5.20	0.03	0.03	0.62	1.20	2.50	1.50	1.40	1.00
Максимум, кг/кг	7.90	0.21	110	1000	19.5	4.90	560	664	6011	250	315	405
Число проб, шт.	178	184	209	172	184	124	209	209	208	169	175	171

* Сокращение НП здесь и далее – нефтепродукты.

по ГОСТ 26483-85². Валовое содержание тяжелых металлов и металлоидов в разные годы определялось в соответствии с РД 52.18.685-2006³, М-МВИ-80-2008⁴. Ртуть определялась методом “холодного пара” атомно-адсорбционной спектрометрии (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98⁵). Нефтепродукты определялись методом ИК-спектрометрии по ПНД Ф 16.1:2:2.22-98⁶.

Стоит отметить, что результаты анализа проб, выполненные методами атомно-эмиссионной спектрометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии, не имеют статистически достоверных отличий, так как оборудование и методики, применяемые для анализа, включают в себя системы коррекции неселективного поглощения, матричных эффектов и других помех.

² ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023490>

³ РД 52.18.685-2006 Методические указания. Определение массовой доли металлов в пробах почв и донных отложений. Методика выполнения измерений методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. URL: <http://docs.cntd.ru/document/898937281>

⁴ М-МВИ 80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии. URL: <http://docs.cntd.ru/document/471813564>

⁵ ПНД Ф 16.1:2.3:3.10-98 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания ртути в твердых объектах методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (метод “холодного пара”). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200080229>

⁶ ПНД Ф 13.1:2.22-98 Количественный химический анализ атмосферного воздуха и выбросов в атмосферу. Методика выполнения измерений объемных долей водорода, кислорода, азота, метана, оксида и диоксида углерода в воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200097740>

Статистическая обработка фактического материала включала выполнение нескольких этапов.

1. Подготовка выборки

Выполнен отсев пробных площадей, не соответствующих определению фоновых по нормативным документам [4, 5, 15, 13, 10]. В результате данной операции исходной размер выборки уменьшился с 456 проб до 209. Расчет основных статистик для полученной выборки представлен в табл. 1.

2. Проверка аппроксимации распределения

В связи с высокими стандартными отклонениями, различиями между центральными тенденциями (медиана, мода, среднее) проведена очистка выборки от экстремальных значений – “выбросов”. Для этого из выборки были исключены значения, находящиеся за пределами полуторного межквартильного интервала (применение границ Тьюки) [17]. После отсева выбросов выборка сохранила результаты не менее 110 проб для любого определяемого компонента, что соответствует [8, п. 240]. При этом среднее количество учитываемых результатов химического анализа проб для всех компонентов – 170.

Стоит отметить, что 75% экстремальных значений содержания нефтепродуктов в пробах соответствует почвам, имеющим торфяной либо грубогумусовый горизонт, либо находящаяся на территориях 1–3-летних “горельников”.

Анализируя географическое распределение “выбросов” в целом по выборке, прослеживается их связь с породами хушминского комплекса карбонатит-мельтейгит-пикритов. В породах комплекса установлены повышенные содержания цинка, хрома, фосфора. Породы этого комплекса

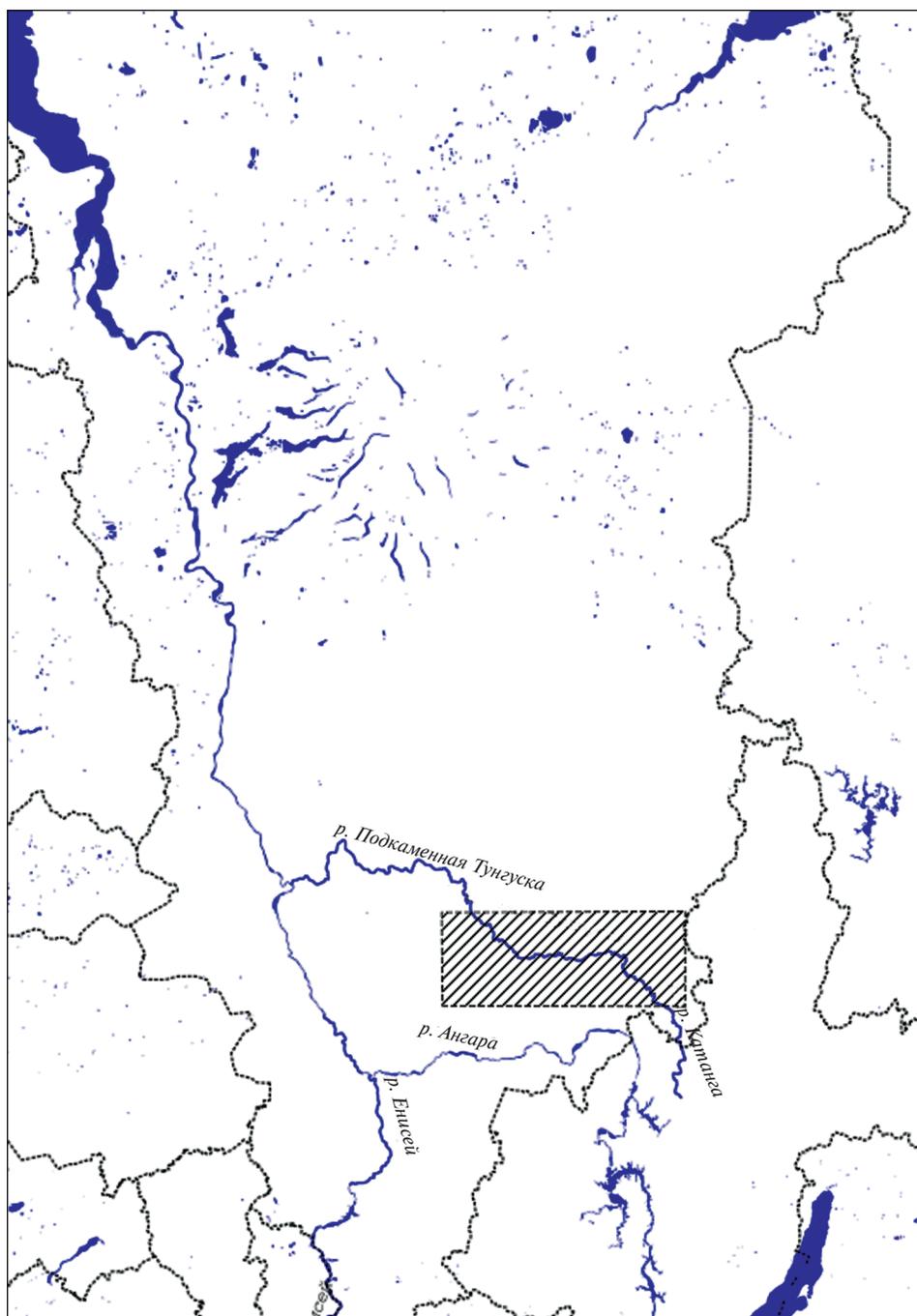


Рис. 1. Карта-схема района исследования.

характеризуются прочными геохимическими связями между собой основных элементов Pb, Cu, Co, Zn, V, Cr, Ni, Ti, Mn. Отмечено, что шлихах по долинам рек Чуня, Тычаны, Корда, Муторай, Подкаменная Тунгуска часто отмечается повышенное содержание галенита (Pb) и сфалерита (Zn) [6].

В целом по выборке (табл. 2) распределения концентрации тяжелых металлов, сульфатов, хлоридов в почвах района исследования подчиняются логнормальному закону, нефтепродуктов и

ионов натрия – нормальному. Водородный показатель – мультимодальному с двумя пиками.

3. Расчет фоновых концентраций

Для всех показателей за исключением pH в рамках данной работы авторами предложено считать за фоновые – значения, лежащие в интервале $(0; \text{среднее} + 3\sigma)$, т.е. принять за фоновые концентрации – концентрации характерные для 99.86% проб полученной выборки. В целом, данный под-

Таблица 2. Основные статистики фоновых проб после отсева экстремальных значений

Компоненты	pH (KCl)	Hg	Pb	Zn	As	Cd	Ni	Cu	НП	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Единицы	ед.	мг/кг										
Распределение	M-M*	Логнормальное							Нормальное		Логнормальное	
Среднее	4.5; 7*	0.026	6.34	51.85	2.84	0.39	29.5	24.57	118.15	23.9	11.14	18.52
Стандартная ошибка		0.0013	0.288	1.655	0.147	0.031	0.919	0.958	6.023	1.294	0.523	0.871
Медиана		0.023	6.2	53	2.6	0.3	30	22	102	20	9	16
Стандартное отклонение		0.017	4.059	21.587	1.871	0.328	13.088	13.349	81.033	16.318	6.489	10.978
Минимум		0.002	0.2	5.2	0.025	0.025	0.62	1.2	2.5	1.5	1.4	1
Максимум		0.08	19	106	9.2	1.5	62.7	64	364	76	29	53
Число проб, шт.		173	198	170	163	110	203	194	181	159	154	159

*Мультимодальное распределение с модами 4.5 и 7 ед. pH.

Таблица 3. Фоновые концентрации элементов в почвах района исследования

Компоненты	Hg	Pb	Zn	As	Cd	Ni	Cu	НП	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Ед. измерения	мг/кг										
Фоновая концентрация (среднее+3σ)	0.079	18.52	116.61	8.45	1.38	68.76	64.61	361.25	72.85	30.61	51.46

Таблица 4. Фоновые концентрации (мг/кг) тяжелых металлов в почвах района исследования в сравнении с данными других работ

Компоненты	Hg	Pb	Zn	As	Cd	Ni	Cu
Фоновая концентрация (среднее+3σ)	0.079	18.52	116.61	8.45	1.38	68.76	64.61
<u>Среднее</u>	<u>0.026</u>	<u>6.34</u>	<u>51.85</u>	<u>2.84</u>	<u>0.39</u>	<u>29.5</u>	<u>24.57</u>
Диапазон	0.002–0.08	0.2–19	5.2–106	0.025–9.2	0.025–1.5	0.62–62.7	1.2–64
<u>Среднее</u> [2]	<u>0.022</u>	<u>11.4</u>	<u>52.3</u>	<u>5.1</u>	<u>0.11</u>	<u>25.6</u>	<u>18.2</u>
Диапазон	0.001–0.22	1.1–68.5	9.4–115	1.1–10.9	0.001–0.8	5–64.8	2.6–68.2

ход в оценке фонового содержания базируется на методологии, изложенной в [8, п. 244] и [17].

Таким образом, для использования при оценке степени загрязнения почв, формирующихся в пределах района исследования, в рамках настоящей работы получены фоновые концентрации соответствующих элементов, представленные в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты в целом соответствуют другим немногочисленным работам (табл. 4). Так, в работе [2] на основе анализа 21000 проб, для почв территории юга Красноярского края получены значения концентраций тяжелых металлов, сопоставимые с полученными в рамках настоящей работы результатами.

Фоновые концентрации для нефтепродуктов, обменного натрия, хлорид и сульфат – ионов представлены в табл. 5. Концентрации нефтепродуктов в почвах имеют достаточно неравномерный характер пространственного распределения, что обусловлено в первую очередь высокой гетерогенностью почвенного покрова и распространения почв с торфяными и оторфованными грубогумусовыми горизонтами. Рассчитанная фоновая концентрация является репрезентативной для подавляющего большинства почв, формирующихся в пределах района исследования. Тем не менее, концентрации нефтепродуктов, классифицированные как выбросы по выборке, в соответствии с критериями [4, 5, 15, 13, 10] также являются фоновыми.

Как было отмечено ранее, большинство выбросов выборки характерны для почв с наличием выраженного торфяного либо грубогумусового

Таблица 5. Фоновые концентрации нефтепродуктов, обменного натрия, хлорид- и сульфат-ионов в почвах района исследования

Компоненты	Нефтепродукты	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Фоновая концентрация (среднее+3σ)	$\frac{361.25^a}{1100^b}$	72.85	30.61	51.46
<u>Среднее</u> <u>Диапазон</u>	$\frac{118.15}{2.5-364}$	$\frac{23.9}{1.5-76}$	$\frac{11.14}{1.4-29}$	$\frac{18.52}{1-53}$

^aФоновая (среднее+3σ) концентрация для минеральных почв.

^bФоновая (мода) концентрация для торфяных (органогенных) почв.

горизонта, а также территориально сопряжены с площадями гарей 1–3 лет. Завышение содержания нефтепродуктов в таких почвах, обусловлено тем, что по своей сути ИК-метод определения нефтепродуктов – метод регистрации алифатических и циклических углеводородов в анализируемом образце. Соответственно, при проведении измерений завышение концентраций нефтепродуктов обуславливают либо битумы оторфованного грубогумусового горизонта, либо частицы древесного угля, являющиеся по химическому составу аморфными высокомолекулярными продуктами, включающими алифатические и ароматические структуры [144, 7]. При оценке степени загрязнения почв района следует учитывать указанную особенность.

Методология определения фонового уровня и оценки степени загрязнения почв нефтепродуктами является дискуссионным вопросом. Авторы работы [166] не относят почвы с содержанием нефтепродуктов до 500 мг/кг к категории загрязненных. Согласно [13], нижняя градация загрязнения почв – 1000 мг/кг. В ПНД Ф 16.1:2.21-98 (издание 2012 г.)⁷ для средне- и южно-таежных подзолов и дерново-подзолистых почв, устанавливаются ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) – 2 г/кг. Согласно принятому нормативу допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации (ДОСНП)⁸, допустимые концентрации для почв района исследования находятся в интервале 2.2–5 г/кг для разных типов почв. Несмотря на то, что концен-

⁷ ПНД Ф 16.1:2.21-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости “Флюорат-02”. URL: https://standartgost.ru/g/ПНД_Ф_16.1:2.21-98

⁸ Постановление правительства Красноярского края №522-п от 03.10.2013 “Об утверждении нормативов допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ на территории Красноярского края в районах развития нефтегазовой отрасли (Юрубчено-Тохомское и Куюмбинское месторождения)”. URL: <http://docs.cntd.ru/document/465804096>

трации, установленные в ОДК и ДОСНП, по определению не могут рассматриваться как фоновые, данные концентрации определяют тот уровень, при достижении которого почвы можно отнести к категории загрязненных. В то же время, РД 52.18.575-96⁹ для нефтедобывающих районов устанавливает фоновые концентрации нефтепродуктов на достаточно низком уровне 100 мг/кг. Более детально проблема оценки фоновых концентраций нефтепродуктов в почвах освещается в публикации [12].

В рамках данной работы, концентрация в 361 мг/кг, определенная как среднее+3σ для очищенной от выбросов нормализованной выборки исходно фоновых проб, характеризует фоновые концентрации нефтепродуктов почв района исследования. Так же, учитывая моду равную 1100 мг/кг для значений концентраций нефтепродуктов в фоновых пробах, определенных как “выбросы”, принимая во внимание вышеуказанные нормативные документы, предлагаем при **оценке загрязнения почв района исследования**, считать верхним пределом фоновых концентраций нефтепродуктов значения для минеральных почв равные 361 мг/кг, для торфяных (органогенных) – 1100 мг/кг.

Используя полученные значения фоновых концентраций, был рассчитан суммарный показатель химического загрязнения Z_c^{10} (в соответ-

⁹ РД 52.18.575-96 Методические указания. Определение валового содержания нефтепродуктов в пробах почвы методом инфракрасной спектроскопии. Методика выполнения измерений. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200036911>

¹⁰ В изыскательской практике на данный момент существуют разночтения относительно расчета Z_c , как относительно формулы расчета, так и относительно учитываемых в расчете элементов. Данные разночтения находят свое отражение в специальной и научной литературе. Таким образом, тема определения и расчета Z_c в настоящий момент сама по себе является предметом дискуссий. По состоянию на конец 2020 г., после отмены СП 47.13330.2012, СП 11-102-97 остается единственным документом, регламентирующим метод расчета Z_c при проведении изысканий. В рамках настоящей работы авторы предлагают считать корректным проведение расчета Z_c с учетом концентраций нефтепродуктов в почвах района исследования.

Таблица 6. Суммарный показатель химического загрязнения проб в различных выборках и критериях уровня фоновых значений

Выборка	Всего проб	Проб с $Z_c < 2$, шт.	Проб с Z_c от 2 до 8 шт	Проб с Z_c от 8 до 32, шт	Проб с Z_c больше 32, шт	Максимальный Z_c	Средний Z_c	Медиана Z_c
Выборка фоновых проб с отсевом выбросов “среднее+3σ”	209	209	0	0	0	1.09	1.04	1.04
Выборка фоновых проб без отсева выбросов. Нефтепродукты 1100 мг/кг	209	177	29	3	0	29	2.7	1.76
Выборка фоновых проб без отсева выбросов. Все фоновые “среднее+3σ”	209	166	38	5	0	29	3	1.89
Выборка проб, не попадающих под определение фоновых	247	26	76	29	6	116	9.13	3.66

ствии с п. 4.20 СП 11-102-97¹¹⁾ для выборки техногенных проб, выборки фоновых проб с отсевом выбросов, выборки фоновых проб с выбросами по критерию “среднее+3σ”. Для выборки фоновых проб с выбросами дополнительно проведен расчет с использованием в качестве фоновой концентрации нефтепродуктов уровень модальных значений – 1100 мг/кг. Результаты представлены в табл. 6.

Ожидаемо, самый низкий суммарный показатель химического загрязнения характерен для выборки с отсевом экстремальных значений. В соответствии с письмом Госкомзема России от 23.12.1993 № 61-5678¹²⁾, у всех проб данной выборки степень загрязнения допустимая. При включении в выборку экстремальных значений, но с учетом в качестве фоновой уровня нефтепродуктов концентрацию в 1100 мг/кг, согласно вышеуказанному письму, к пробам с допустимой степенью загрязнения теперь относятся 177 проб, со слабой – 29 проб, средней – 3 пробы. Принимая в качестве фоновой значения концентрации нефтепродуктов 361 мг/кг, при прочих равных условиях, количество проб со средней степенью загрязнения увеличится на 2 единицы, со слабой на 9.

При расчете Z_c для выборки проб, изначально не относящихся к фоновым, при сопоставимом объеме этой выборки, кратно возрастает группа проб со средней степенью загрязнения, при появлении категорий проб сильно и очень сильно загрязненных.

¹¹⁾ СП 11-102-97 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Официальное издание. М.: ПНИИИС Госстроя России, 1997. URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001220>

¹²⁾ О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9033369>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы оценены фоновые концентрации элементов в почвах района исследования с использованием стандартного статистического аппарата. Методология оценки базируется на положениях, изложенных в [8, п. 244] и [17].

Полученные в результате работы фоновые значения позволили оценить степень загрязнения почв района исследования. При широком диапазоне Z_c для почв с техногенных участков (вплоть до очень сильной степени загрязнения), фоновые пробы (даже с учетом экстремальных значений) характеризуются в основном как допустимо загрязненные.

В рамках работы отмечены особенности определения нефтепродуктов в почвах района исследования.

Использование фоновых концентраций существенно повышает степень достоверности проводимых в пределах района исследования надзорных мероприятий, инвентаризации нарушенных земель, проектно-изыскательских, рекультивационных и иных работ, в которых для принятия решений требуется учитывать исходное – фоновое состояние почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варганов А.С., Попова Н.Н., Сосновская О.В., Смокотина И.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист Р-47 Байкит. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 359 с.
2. Волошин Е.И. Содержание и распределение микроэлементов в почвах средней Сибири // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 4. С. 28–37.
3. Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири. М.: Изд-во МГУ, 1962. С. 161–162.

4. ГОСТ 27593-88 Почвы. Термины и определения. <http://docs.cntd.ru/document/1200007341>
5. ГОСТ Р 56828.38-2018 Наилучшие доступные технологии. Окружающая среда. Термины и определения. <http://docs.cntd.ru/document/1200159345>
6. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Тунгусская. Лист Р-47-XXX / В.Н. Котков и др. Ред. Д.И. Мусатов. Л.: Аэрогеология, 1980. Объяснительная записка / В.Н. Котков и др. Ред. Д.И. Мусатов. М.: Союзгеолфонд, 1986. 214 с.
7. *Завьялов А.Н., Калугин Е.Н.* Древесный уголь // *Химия древесины*. 1978. № 4. С. 88–92.
8. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / Министерство геологии СССР. М.: Недра, 1983. 191 с.
9. *Коротков И.А.* Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // *Углерод в экосистемах лесов и болот России*. Красноярск: Институт леса СО РАН, 1994. С. 29–47.
10. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. Методические рекомендации Госкомзема России от 28.12.1994. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902101153>
11. Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель, 2011. 632 с.
12. *Околелова А.А., Желтобрюхов В.Ф.* Особенности определения и нормирования нефтепродуктов в почвах // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2013. № 1(1). С. 12–18.
13. Письмо Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ от 27.12.1993 N 04-25 “О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами”. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9033369>
14. *Пятыгина М.В., Мингалеева Г.Р.* Комплексное использование торфа на основании молекулярного состава его органической массы // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 5-6. С. 3–13.
15. РД 52.18.718-2008 Организация и порядок проведения наблюдений за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200081126>
16. *Шарафутдинов Р.А., Митев А.Р., Романов А.А., Борисова И.В.* Содержание нефтепродуктов в почвенном покрове г. Красноярска // *Вестник КрасГАУ*. 2018. № 6 (141). С. 289–293.
17. ISO 19258:2018 Soil quality – Guidance on the determination of background values. URL: <https://www.iso.org/standard/67982.html>

BACKGROUND CONCENTRATIONS OF TRACE ELEMENTS IN SOILS OF THE PODKAMENNAYA TUNGUSKA RIVER BASIN

A. R. Mitev^{a,#} and R. A. Sharafutdinov^{b,##}

^a *RN-Krasnoyarsk NIPIneft LLC, Rosneft Corporate Research and Development Complex, ul. 9 Maya, 65d, Krasnoyarsk, 660098 Russia*

^b *Institute of Ecology and Geography, Siberian Federal University, Svobody pr., 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

[#] *E-mail: MitevAR@knipi.rosneft.ru*

^{##} *E-mail: rsharafutdinov@sfu-kras.ru*

The work summarizes the results of long-term geoecological studies in the soil cover of the Podkamennaya Tunguska River basin. The samples characterize the upper 20-cm soil layer, which performs the most pronounced integral ecological function and is primarily exposed to negative physical and chemical influences as a result of human economic activities. The obtained background concentrations are typical (representative) for Umbric Podzols, Histic Phaeozem, Dystric Fluvisols, Leptic Fluvisols, Histic Fluvisols Oxyaquic, and Histosols Sapric. Total petroleum hydrocarbons (TPH) were determined through infrared spectrometry. The total content of heavy metals in the studied soils were found by atomic emission spectroscopy (AES) and atomic absorption spectroscopy (AAS). Background concentrations were analyzed in accordance with ISO 19258-2018. A total of 456 samples were studied. For background concentration, the values were taken in the range [0; mean + 3σ] mg/kg. Background concentrations were determined for mercury (0.079 mg/kg), lead (18.52 mg/kg), zinc (116.61 mg/kg), arsenic (8.45 mg/kg), cadmium (1.38 mg/kg), nickel (68.76 mg/kg), copper (64.61 mg/kg), petroleum hydrocarbons (361.25 mg/kg), chlorides (30.61 mg/kg), and sulfates (51.46 mg/kg).

Keyword: *soils, pedology, background concentrations, pedogeochemical concentration, heavy metals, trace elements, Central Siberia, Podkamennaya Tunguska, middle-taiga landscapes, Hg, Pb, Zn, As, Cd, Ni, Cu, petroleum hydrocarbons*

REFERENCES

- Varganov, A.S., Popova, N.N., Sosnovskaya, O.V., Smokotina, I.V., et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tre'tie pokolenie). Seriya Angaro-Eniseiskaya. List P-47 – Baikit. Ob'yasnitel'naya zapiska*. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1 000 000 (third generation). Angara-Yenisei series. Sheet P-47 – Baikit. Explanatory note]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2015, 359 p. (in Russian)
- Voloshin, E.I. *Soderzhanie i raspredelenie mikroelementov v pochvakh srednei Sibiri* [The content and distribution of trace elements in soils of the Central Siberia]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008, no. 4, pp. 28–37. (in Russian)
- Voskresenskii, S.S. *Geomorfologiya Sibiri*. [Geomorphology of Siberia]. Moscow, MGU Publ., 1962, 352 p. (in Russian)
- GOST 27593-88 Pochvi. Termini i opredeleniya*. [State Standard 27593-88 Soils. Terms and definitions]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200007341> (in Russian)
- GOST R 56828.38-2018 Nailuchshie dostupnye tekhnologii. Okruzhayushaya sreda. Termini i opredeleniya*. [Best available techniques. Environment. Terms and definitions] Moscow, Standartinform Publ., 2018, 35 p. (in Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1: 00 000. Seriya Tunguskaya. List P-47-XXX* [State geological map of the USSR. Scale 1: 200,000. Tunguska series. Sheet P-47-XXX]. D.I. Musatov (Ed.), Leningrad, Aerogeologiya Publ., 1980. Explanatory note., Moscow, Soyuzgeolfond Publ., 1986, 214 p. (in Russian)
- Zav'yalov, A.N., Kalugin, Ye.N. *Drevesnyi ugol'* [Charcoal]. *Khimiya drevesiny*, 1978, no. 4, pp. 88–92. (in Russian)
- Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdenii* [Instruction on geochemical methods of prospecting for ore deposits]. Ministry of Geology of the USSR. Moscow, Nedra, 1983, 191 p. (in Russian)
- Korotkov, I.A. *Lesorastitel'noe raionirovanie Rossii i respublik byvshego SSSR* [Forest zoning of Russia and the republics of the former USSR]. *Uglerod v ekosistemakh lesov i bolot Rossii*. Krasnoyarsk, Institute of Forestry, SB RAS, 1994, pp. 29–47. (in Russian)
- Metodicheskie rekomendatsii po vyyavleniyu degradirovannykh i zagryaznennykh zemel'. Metodicheskie rekomendatsii Goskomzema Rossii ot 28/12/1994* [Methodological recommendations for identifying degraded and contaminated lands. Methodological recommendations of the State Committee for Land Resources of Russia dated December 28, 1994. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902101153> (in Russian)
- Natsional'nyi atlas pochv Rossiyskoi Federatsii* [National atlas of soils of the Russian Federation]. Moscow, Astrel Publ., 2011, 632 p. (in Russian)
- Okolelova, A.A., Zheltobryukhov, V.F. *Osobennosti opredeleniya i normirovaniya nefteproduktov v pochvakh* [Peculiarities of determination and standardization of oil products in soils]. *Yestestvenno-gumanitarnye issledovaniya*, 2013, no. 1 (1), pp. 12–18. (in Russian)
- Letter of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation, data December 27, 1993 N 04-25 “On the procedure for determining the amount of damage from land pollution by chemical substances.” URL: <http://docs.cntd.ru/document/9033369> (in Russian)
- Pyatygina, M.V., Mingaleeva, G.R. *Kompleksnoe ispol'zovanie torfa na osnovanii molekularnogo sostava ego organicheskoi massy* [Complex use of peat on the basis of the molecular composition of its organic mass]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2017, vol. 19, no. 5–6, pp. 3–13. (in Russian)
- RD 52.18.718-2008 Organizatsiya i poryadok provedeniya nablyudenii za zagryazneniem pochv toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya* [State Standard 52.18.718-2008 Organization and procedure for monitoring soil pollution by toxicants of industrial origin]. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Rosgidromet. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200081126> (in Russian)
- Sharafutdinov, R.A., Mitev, A.R., Romanov, A.A., Borisova, I.V. *Soderzhanie nefteproduktov v pochvennom pokrove g. Krasnoyarska* [The content of oil products in the soil cover of Krasnoyarsk]. *Vestnik KrasGAU*, 2018, no. 6 (141), pp. 289–293. (in Russian)
- ISO 19258:2018 Soil quality – Guidance on the determination of background values. URL: <https://www.iso.org/standard/67982.html>

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 554.1

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЕШИФРИРОВАНИЯ
ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ
АЭРО- И КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМОК НА ОСНОВЕ
ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
(ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОНИТОРИНГУ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ)**

© 2021 г. Т. В. Орлов^{1,*}, А. В. Зверев¹, В. В. Бондарь¹

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

*E-mail: tim.orlov@gmail.com

Поступила в редакцию 06.11.2020 г.

После доработки 18.11.2020 г.

Принята к публикации 18.11.2020 г.

Для эффективного мониторинга опасных геологических процессов на территориях линейных сооружений наиболее распространенным методом наблюдения и анализа является использование данных дистанционного зондирования Земли. Широко применяются космическая и аэрофотосъемки для контроля опасных процессов, развивающихся во всех природных условиях территорий. Сравнительная оценка возможностей выявления экзогенных геологических процессов с помощью аэро- и космической съемки разного разрешения — ключевой этап при анализе качества и полноты информации на снимках. Оценка информации, в первую очередь, включает в себя проведение прямого сравнения параметров, таких как количество очагов, длина и площадь выявленных экзогенных геологических процессов (ЭГП), затем проводится сравнение долей ЭГП по количеству проявлений и линейным размерам. Сравнительный анализ изображений на выбранных репрезентативных участках, на которых отмечено наибольшее количество и разнообразие процессов, таких как подтопление—обводнение, подтопление—подпор, термоэрозия, эрозия, термокарст, зоны развития бугристых торфяников, показал существенные различия в полноте интерпретации информации. Дешифрирование космических снимков позволяет выделить до 85% проявлений ЭГП и практически в полном объеме выделяются условия их развития. При дешифрировании аэрофотоснимков наиболее точно определяются параметры длины и площади, выявляется гораздо больше очагов проявления опасных процессов, чем при дешифрировании космических снимков. Наиболее целесообразный способ мониторинга линейных сооружений — использование сочетания космических снимков и аэрофотосъемки разного разрешения.

Ключевые слова: космическая съемка, аэрофотосъемка, дешифрирование, мониторинг

DOI: 10.31857/S0869780921010082

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время линейные сооружения (железные и автомобильные дороги, нефте- и газопроводы) создаются и эксплуатируются во всех природных условиях территорий. Различные экзогенные геологические процессы (ЭГП) угрожают штатному функционированию линейных сооружений. Использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет существенно снизить затраты при ведении мониторинга процессов из-за большой протяженности линейных сооружений.

Космическая и аэрофотосъемка активно используются при изучении и контроле экзогенных процессов: широко применяется при анализе карстовых процессов [1], где определяется плот-

ность распространения суффозионно-карстовых воронок покрытого карста; для эрозионных процессов оценивается их рост [11] и вероятность развития [19]. В криолитозоне также есть примеры широкого использования: например, для полигонально-жильных льдов картируется их рисунок [18, 23] и оценивается влияние их деградации на гидрологию тундры [16], изучается береговая термоэрозия [20]. Для термокарстовых процессов определяется влияние сезонного протаивания на бассейны спущенных термокарстовых озер [22], динамика озер [17], ведется их мониторинг [10, 15], оценивается спуск озер [21]. Ведется выделение комплексных структур [14], дешифрирование процессов [13], оцениваются их сложные параметры [2].

Таблица 1. Краткий обзор современных продуктов, пригодных для выявления развития ЭГП в полосе отвода трассы трубопровода

Тип	Название	Разрешение	Возможная периодичность для линейных сооружений*	Оценочная стоимость однократной новой съемки, для линейного сооружения протяженностью 100 км
Космическая съемка	Продукты компании Digital Globe (QuickBird, Ge Eye, WorldView 2), Airbus (Pleidas)	0.5–0.6 м/пикс панхроматический канал, 2 м/пикс мультиспектральный	2–4 раза в год	400000
	Продукты компании Digital Globe (WorldView 3,4)	0.3 м/пикс панхроматический канал, 2 м/пикс мультиспектральный		480000
Аэрофото-съемка	Аэрофотосъемка в комбинации с лазерным сканированием	до 0.05 м/пикс высокодетальная ЦМР	1 раз в 2 месяца	1000000**
	Аэрофотосъемка с БПЛА			

*Периодичность оценена на основе реального опыта работ.

**Указана оценочная стоимость, реальную стоимость оценить невозможно, так как она напрямую зависит от протяженности всей трассы трубопровода, расстояния от аэропортов вылета, наличия инфраструктуры и др.

Основным методом интерпретации информации дистанционного мониторинга для целей выявления ЭГП остается экспертное дешифрирование. Полуавтоматизированные методы пока не получили широкого применения.

Работы, связанные с применением дистанционных данных при проектировании и строительстве линейных сооружений, не так многочисленны, однако, эти данные используются для дешифрирования линейных зон тектонических нарушений [8], разрабатывается методический аппарат [5], ведется анализ природных условий [3, 9], проводится вероятностное моделирование [4, 24]. Иногда используются специфические дистанционные материалы, такие как результаты аэровизуальных обследований [12]. Однако, оптимальность использования тех или иных видов съемок применительно к линейным сооружениям и ЭГП еще не до конца исследована.

В настоящее время наблюдается значительное разнообразие средств получения дистанционной информации для ее последующей обработки и анализа (табл. 1).

В современных условиях для объектов, расположенных в криолитозоне, при малом периоде активизации экзогенных процессов периодичность космической и аэрофотосъемок оказывается сравнимой. Однако время получения данных аэрофотосъемки значительно больше из-за сложностей в организации съемочного процесса, а также из-за требований по прохождению дополнительных проверок и более сложного процесса обработки информации [7].

Цель работы – сравнительная оценка возможностей выявления ЭГП при мониторинге линейных сооружений в зоне многолетней мерзлоты с

помощью космической съемки с разрешением 0.5 м/пикс и аэрофотосъемки с разрешением 0.2 м/пикс.

Исследование проведено для магистрального трубопровода в Восточной Сибири, в зоне горной тайги и тундры на южной границе распространения многолетней мерзлоты. Космо- и аэрофотосъемка были выполнены примерно в одно время, через год, после окончания строительства трубопровода. Криогенные процессы имели достаточно слабое развитие до начала строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для сравнительного анализа использовались космические снимки высокого разрешения (0.5 м/пикс), а также сканерные аэрофотоснимки с разрешением 0.2 м/пикс. В качестве вспомогательной информации применялись следующие базовые картографические продукты:

- цифровые модели рельефа масштабов 1:25000, 1:5000, на основе которых был получен ряд производных показателей: кривизна, крутизна склонов, классификация элементарных поверхностей, классификация морфоструктур, эрозионный индекс, индекс плоскостного смыва и др.;
- геологические карты;
- ландшафтные карты и карты растительности;
- результаты аэровизуального и полевого обследования.

Были выделены репрезентативные участки с проявлением широкого набора опасных экзогенных процессов. Всего выделено 9 участков протяженностью от 2.5 до 19.5 км. Общая протяженность полосы сравнительного анализа составила 45 км при ширине полосы обследования – 100 м.

Для каждого участка была разработана картографическая геоинформационная модель, позволяющая одновременно анализировать как материалы космосъемки и аэрофотосъемки, так и базовые картографические продукты.

В основу интерпретации положено сочетание прямых дешифровочных признаков и индикационного дешифрирования [6]. В качестве прямых дешифровочных признаков при экспертном дешифрировании использовались: цвет, форма контуров, ориентировка контуров, взаимное расположение, соседство контуров, микроструктура изображения и др. При индикационном дешифрировании применялись признаки отдельных компонентов среды (растительный покров, формы рельефа, особенности открытой поверхности почв и др.).

Особое внимание при дешифрировании было уделено текстурным дешифровочным признакам, как наиболее информативным.

Для установления дешифровочных признаков, прежде всего, характеризующих текстуру изображения, проведен выборочный анализ материалов аэро- и космосъемки.

На рис. 1 приведены эталонные изображения аэрофотосъемки (с разрешением 0.2 м/пикс) и космической съемки (0.5 м/пикс) для основных экзогенных геологических процессов и явлений. Наиболее часто встречающимися процессами и явлениями в пределах исследуемой трассы магистрального трубопровода являются подтопление—обводнение, подтопление—подпор, термоэрозия, эрозия, термокарст, зоны развития бугристых торфяников:

- под процессами подтопления—обводнения понималось появление водного зеркала в пределах трассы трубопровода достаточно значительной площади;

- под процессами подтопления—подпора понималось появление водного зеркала, сформированного потоком воды по градиенту рельефа, подпертого структурами трубопровода;

- под эрозионными процессами понималась, в первую очередь, линейная эрозия без признаков термоэрозионных процессов, в пределах расчистки трубопровода; эрозия могла быть направлена вдоль или поперек оси трубы;

- под термоэрозионными процессами понимались линейные проявления эрозии, сопровождающиеся вытаиванием мерзлого грунта;

- под просадочно-термокарстовыми процессами понимались процессы вытаивания мерзлого грунта, с формированием просадок в пределах полосы трубопровода, часто заполненных водой;

- в качестве зон развития бугристых мерзлых торфяников выделялись участки развития торфяных высокольдистых отложений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основным элементом сравнительного анализа было численное сравнение количества и размеров выявленных ЭГП обоими методами. На первом этапе было проведено прямое сравнение параметров: количество очагов, длина (для линейных проявлений) и площадь (для площадных проявлений) выявленных ЭГП по каждому из участков. На втором этапе проведено сравнение долей выявленных процессов по количеству проявлений и линейным размерам. Результаты сравнений по каждому из этапов приведены в табл. 2, 3 соответственно.

В табл. 2 приведен результат сравнения параметров выявленных процессов по каждому из участков. Из анализа результатов видно, что полнота интерпретации ЭГП по космическим снимкам с разрешением 0.5 м/пикс и по аэрофотоснимкам с разрешением 0.2 м/пикс существенно различается. В первую очередь, можно выделить разницу количества выделенных очагов ЭГП — оно значительно больше по аэрофотоснимкам, чем по космическим снимкам. Разница в протяженности и площади ЭГП проявляется менее четко, однако, при дешифрировании космических снимков на многих участках параметры длины и площади процессов либо определены не точно, либо не определены вовсе. Наиболее существенные различия в качестве интерпретации ЭГП наблюдаются для процессов эрозии и подтопления—обводнения, которые распространены на всех участках и встречаются наиболее часто. Для них на аэрофотоснимках было выделено гораздо больше очагов проявления, а также более точно определены параметры длины и площади.

На рис. 2 приведен фрагмент результатов дешифрирования с использованием аэрофотосъемки и космической съемки, который иллюстрирует разницу в качестве интерпретации снимков.

Участки проявления бугристых торфяников как зоны, в которой возможна активизация ЭГП, анализировались отдельно. Бугристые торфяники были выделены на участках 7, 8 и 9.

Результаты дешифрирования природно-территориальных комплексов этого типа при интерпретации как космических снимков, так и аэрофотоснимков оказались одинаковыми, так как комплексы больших площадей определяются легче и точнее.

В табл. 3 приведена доля выделенных ЭГП. За 100% принималось максимальное количество очагов или максимальное проявление процессов, установленное с помощью дешифрирования аэрофотосъемки и космосъемки.

Как видно из анализа результатов, представленных в табл. 3, по аэрофотосъемке удается выделить очаги ЭГП и определить их протяженность практически во всех случаях более точно,

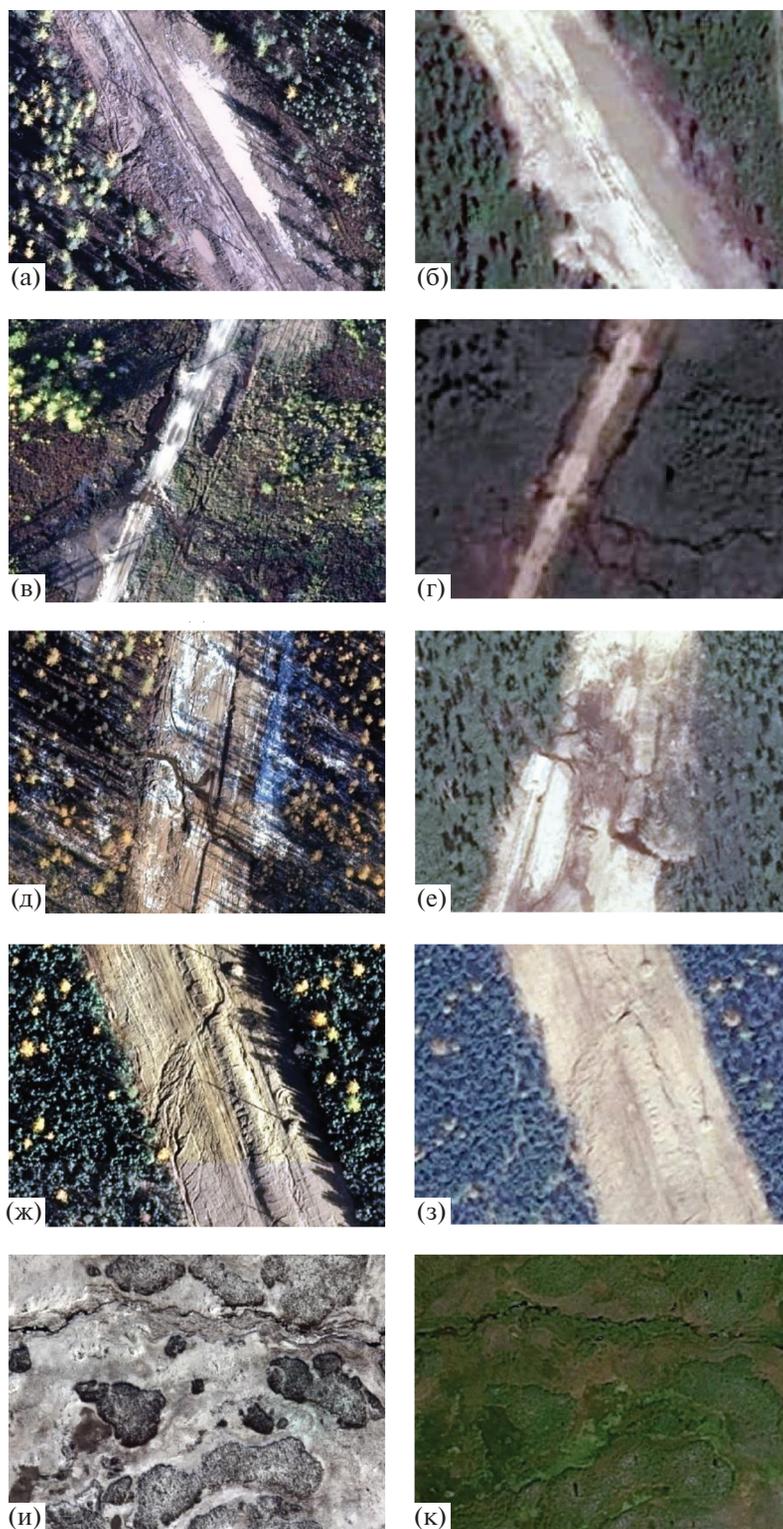


Рис. 1. Дешифровочные эталоны ЭГП. Подтопление—обводнение: а — аэрофотосъемка, б — космосъемка; подтопление—подпор: в — аэрофотосъемка, г — космосъемка; термоэрозия: д — аэрофотосъемка, е — космосъемка; эрозия: ж — аэрофотосъемка, з — космосъемка; бугристые мерзлые торфяники: и — аэрофотосъемка, к — космосъемка.

чем по космосъемке. Процент выделенных очагов по космическим снимкам составляет в среднем 30%, но для отдельных процессов, таких как, например, подтопление-подпор, он составляет

89%. Как уже отмечалось ранее, бугристые торфяники выделяются одинаково хорошо, как по аэрофотосъемке, так и космосъемке. При этом общая протяженность выделенных ЭГП состав-

Таблица 2. Результат сравнения параметров выявленных процессов по каждому из участков

№	Протяженность, км	Проявления ЭГП	Выделенные по космоснимкам 0.5 м/пикс			Выделенные по аэрофотоснимкам 0.2 м/пикс		
			Кол-во очагов	Длина, м	Площадь, м ²	Кол-во очагов	Длина, м	Площадь, м ²
1	3.5	Подтопление—обводнение	6		300	9		640
		Эрозия	0			3	347	50
2	2.5	Подтопление—обводнение	5		1130	6		1090
		Просадочно-термокарстовые	0			1		50
		Эрозия	1	40		2	60	
3	2.5	Просадочно-термокарстовые	0			1		50
		Эрозия	2	446		14	852	
4	2.5	Подтопление—обводнение	0			1		50
		Эрозия	6	154		13	831	
5	4.5	Эрозия	0			4	538	
6	2.5	Подтопление—обводнение	2		100	7		350
7	2.5	Подтопление—обводнение	0			3		150
		Подтопление—подпор	1		5080	2	238	7000
		Термоэрозия	0			4	624	
8	3.5	Подтопление—обводнение	7		4770	13		5070
		Подтопление—подпор	2		190	3		810
		Просадочно-термокарстовые	0			5		250
		Термоэрозия	0			3	311	
		Эрозия	6	513		6	533	
9	19.5	Подтопление—обводнение	25		49190	100		58190
		Подтопление—подпор	5		250	4		970
		Просадочно-термокарстовые	0			8		380
		Термоэрозия	0			5	1266	
		Эрозия	16	2423		66	8351	
Σ	43.5		84	3766	70100	283	13951	75100

Таблица 3. Доля выделенных ЭГП

Проявления ЭГП	Выделенные по космоснимкам 0.5 м/пикс			Выделенные по аэрофотоснимкам 0.2 м/пикс			Доля параметров выявленных процессов, %		
	кол-во очагов	длина, м	площадь, м ²	кол-во очагов	длина, м	площадь, м ²	кол-во очагов	протяженность	площадь
Подтопление—обводнение	45	0	55490	139	0	65540	32		85
Подтопление—подпор	8	0	5520	9	238	8780	89		63
Просадочно-термокарстовые	0	0	0	15	0	730	0		0
Термоэрозия	0	0	0	12	2201	0	0	0	0
Эрозия	31	3576	0	108	11512	50	29	31	0
Итого для ЭГП	84	3576	61010	283	13951	75100	30	15.5	29.6
Бугристые торфяники*	6		4277430	6		4277430	100		100

*Бугристые торфяники анализировались отдельно из-за значительно больших площадей проявления по сравнению с другими ЭГП.

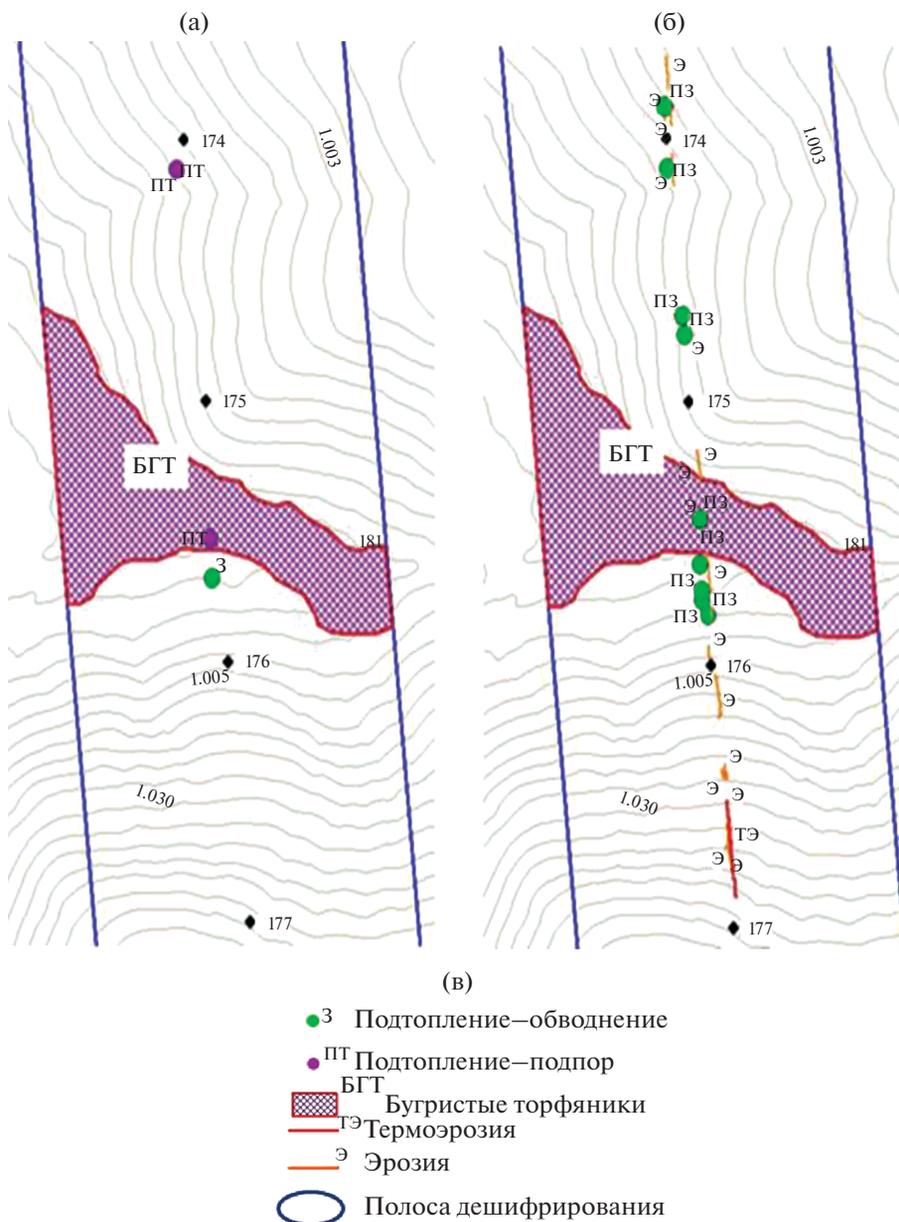


Рис. 2. Фрагмент результатов дешифрирования с использованием космической съемки (а) и аэрофотосъемки (б) и условные обозначения (в).

ляет для линейных проявлений 15.5%, для площадных проявлений 29.6%.

Низкий процент выявления линейных проявлений связан с начальными стадиями развития процессов, в первую очередь, термоэрозии и, соответственно, недостаточной шириной проявления процесса для уверенного дешифрирования. Процент выявления площадных проявлений является также низким, это связано в первую очередь с тем, что на начальных стадиях развития процесса, например, термокарстового, просадочные формы имеют малые размеры и не выделяются при дешифрировании материалов космосъемки. Однако, для процессов обводнения, имеющих

зачастую значительные размеры и являющихся катализатором дальнейшего развития термокарстового процесса, процент выделения проявлений достигает 85%.

Можно сделать вывод, что использование снимков более мелкого масштаба значительно снижает точность выделения отдельных очагов, но при этом из-за генерализации точность выделения зон, подверженных ЭГП, падает не так значительно.

Наиболее точно по космическим снимкам выделяются участки с развитием бугристых торфяников и в некоторых случаях процессы обводнения. Линейные проявления процессов по космосъемке вы-

деляются недостаточно хорошо, в первую очередь потому, что ширина их проявлений часто оказывается недостаточна для уверенного выделения на снимках с разрешением 0.5 м/пикс.

Из анализа результатов дешифрирования видно, что на данном участке трассы за счет использования аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения удалось выявить значительное количество дополнительных очагов ЭГП.

В настоящее время широкое развитие начинает получать мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). К сожалению, в настоящее время у авторов отсутствует соответствующий материал по той же территории, поэтому сравнительный анализ провести сложно. Однако, надо отметить, что использование БПЛА существенно повышает наглядность снимков процессов, позволяет засекать их в самых ранних стадиях. С другой стороны, трудоемкость организации мониторинга с помощью БПЛА значительно выше, чем с помощью космической съемки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показывают возможности дешифрирования различных экзогенных геологических процессов с помощью космической и аэрокосмической съемок, и выявляют основные различия между качеством интерпретации снимков. Полученные данные в дальнейшем могут применяться при изучении, контроле и мониторинге экзогенных процессов в зоне строительства линейных сооружений.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование космических снимков с разрешением 0.5 м/пикс позволяет выделить до 85% проявлений ЭГП и до 100% проявлений условий развития ЭГП.

2. При дешифрировании аэрофотоснимков с разрешением 0.2 м/пикс выявляется гораздо больше очагов проявления ЭГП, а также наиболее точно определяются параметры длины и площади процессов на исследуемых участках. При этом, в среднем с помощью космической съемки выделяется в 3–6 раз меньше проявлений ЭГП, что существенно снижает качество интерпретации снимков.

3. Целесообразно использовать сочетание космических снимков с разрешением 0.5 м/пикс и аэрофотосъемки 0.2 м/пикс для выделения как локальных очагов ЭГП, так и тенденций развития ЭГП на большей площади.

4. Недостатками использования только аэрофотосъемки высокого разрешения являются ограниченная обзорность аэрофотоснимков и существенные потери времени на обработку и подготовку снимков.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА–А19–119021190077–6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов В.С., Волин К.А., Журавлев Е.А. Выявление карстовых и суффозионно-карстовых объектов по материалам космических съемок в центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2016. № 4. С. 4–16.
2. Викторов А.С. Оценка динамических параметров экзогенных геологических процессов по материалам однократных аэрокосмических съемок // Геоэкология. 2014. № 2. С.
3. Викторов А.С., Георгиевский Б.В., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н., Зверев А.В. Опыт дистанционного мониторинга опасных геологических процессов по трассе трубопроводных систем (Восточная Сибирь) // Геоэкология. 2018. № 6. С. 50–58.
4. Викторов А.С., Капралова В.Н., Архипова М.В. Моделирование развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин с использованием материалов дистанционных съемок // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 55–64.
5. Лихвидов А.А., Черномуров М.В., Гришин В.В. Методический аппарат тематического дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли в коридоре магистральных газопроводов // Наука. Инновации. Технологии. 2013. № 1. С. 124–129.
6. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1:200000. М.: Недра, 1978. 393 с.
7. Методы дистанционного зондирования Земли при решении природоресурсных задач / Под ред. А.Ф. Морозова, А.В. Перцова. СПб: ВСЕГЕИ, 2004.
8. Николаев Г.Б., Илларионов В.А., Вайс К.Е. Применение дистанционных съемок при проектировании и строительстве линейных сооружений в условиях Европейского Севера // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 11. С. 20–23.
9. Пупырев М.А. Дешифрирование и индикация современных экзогенных процессов в геокриологическом мониторинге криолитозоны // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 4. С. 67–75.
10. Пупырев М.А., Иванов О.Е. ГИС-анализ инженерно-геокриологических условий освоения западного Ямала на основе приемов ландшафтной индикации // Вестник Тюменского государственного университета. 2008. Т. 3. № 2. С. 215–222.
11. Сатдаров А.З. Методы исследования регрессивного роста оврагов: достоинства и недостатки // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2016. Т. 158. № 2. С. 277–292.
12. Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Хименков А.Н., Халилова Ю.В., Угаров А.Н. Аэровизуальные обследования для оценки опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода (глава 13) // Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хране-

- ния и транспорта энергоресурсов. Науч. рук. Махутов Н.А. М.: МГОФ “Знание”, 2019. С. 295–309.
13. *Слагода Е.А., Ермак А.А.* Дешифрирование экзогенных процессов типичных тундр полуострова Ямал на примере территории района среднего течения реки Юрибей // Вестник Тюменского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2014. № 4. С. 28–38.
 14. *Холодилов И.В.* Комплексное картографирование эталонных зональных структур на основе анализа данных дистанционного зондирования // Вестник Тюменского государственного университета. 2009. № 3. С. 29–35.
 15. *Якутин М.В., Пучнин А.Н.* Мониторинг термокарстовых образований в центральной Якутии с использованием методов дистанционного зондирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 4. № 2. С. 120–124.
 16. *Anna K. Liljedahl et al.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature geoscience. 2016. P. 1–8.
 17. *Boike Julia, Yoshikawa Kenji.* Mapping of Periglacial Geomorphology using Kite/ Balloon Aerial Photography // Permafrost and periglacial processes. 2003. V. 14. P. 81–85.
 18. *Sannel, A.B.K., Brown, I.A.* High-resolution remote sensing identification of thermokarst lake dynamics in a subarctic peat plateau complex // Canadian Journal of Remote Sensing. 2010. V. 36. № 1. P. S26–S40.
 19. *Eroglu H. et al.* Using high resolution images and elevation data in classifying erosion risks of bare soil areas in the Hatila Valley Natural Protected Area, Turkey // Stoch Environ Risk Assesse. 2010. 24. P. 699–704.
 20. *Günther F. et al.* Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction // Cryosphere. 2015. № 9. P. 151–178.
 21. *Kenneth M. Hinke et al.* Methods to assess natural and anthropogenic thaw lake drainage on the western Arctic coastal plain of northern Alaska // Journal of Geophysical research. 2007. V. 11. F02S16.
 22. *Liu L., Schaefer K., et al.* Seasonal thaw settlement at drained thermokarst lake basins, Arctic Alaska // Cryosphere. 2014. 8. P. 815–826.
 23. *Ulrich M., Grosse G., Jens Strauss J., Schirmeister L.* Quantifying wedge-ice volumes in Yedoma and thermokarst basin deposits // Permafrost and periglacial processes. 2014. V. 25. № 3. P. 151–161.
 24. *Victorov A.S., Orlov T.V., Kapralova V.N., Trapeznikova O.N., Sadkov S.A., Zverev A.V.* Stochastic Modeling of Human-Induced Thermokarst and Natural Risk Assessment for Existing and Planned Engineering Structures // Natural Hazards and Risk Research in Russia. Svalova V. (eds). 2019. Springer, Cham. P. 219–239.

COMPARATIVE ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF DELINEATION OF GEOHAZARDS USING AIRBORNE AND SATELLITE IMAGES (PIPELINE CASE STUDY)

T. V. Orlov^{a, #}, A. V. Zverev^a, and V. V. Bondar^a

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

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

For effective monitoring of geohazards for the pipelines, remote sensing data are the most common observation and analysis methods. Space and aerial photography are widely used to control hazardous processes occurring under natural conditions. Comparative assessment of the possibilities of identifying exogenous geological processes using airborne and satellite imagery of different resolutions is a crucial step in analyzing the quality and completeness of information obtained from images. Evaluation of information, first of all, includes a direct comparison of parameters, such as the number of foci, the length, and the area of identified exogenous processes; next the geohazard shares are compared by the number of manifestations and linear dimensions. The principal hazards were analyzed, such as flooding-waterlogging, flooding-backwater effect, thermal erosion, erosion, thermokarst, zones of hummocky peatland development. The comparative analysis of images showed a significant difference in the completeness of information interpretation. Deciphering space images makes it possible to determine up to 85% of geohazard manifestations, and the conditions for their development are almost completely identified. When interpreting aerial images, the parameters of length and area are most accurately determined. Much more centers of the geohazard manifestation are revealed, as compared to those provided from deciphering space images. Using space images and aerial photography of different resolutions in combination appears to be the best suitable way to monitor the linear structures.

Keywords: *satellite images, airborne images, deciphering, monitoring*

REFERENCES

1. Antipov, V.S., Volin, K.A., Zhuravlev, E.A. *Vyavlenie karstovykh i suffozionno-karstovykh ob'ektov po materialam kosmicheskikh s'emok v sentral'noi chasti Vostochnoi-Evropeiskoi platformy* [Identification of karst and suffusion-karst objects from space imagery in the central part of the East European platform]. *Vestnik SPb-GU*, ser. 7. Geology. Geography, 2016, no. 4, pp. 4–16. (in Russian)
2. Viktorov, A.S. *Otsenka dinamicheskikh parametrov ekzogennykh geologicheskikh protsessov po materialam odnokratnykh aerokosmicheskikh s'emok* [Estimation of dynamic parameters of exogenous geological processes based on materials of single aerospace surveys]. *Geokologiya*, 2014, no. 2, pp. 146–154. (in Russian)

3. Viktorov, A.S., Georgievskii, B.V., Kapralova, V.N., Orlov, T.V., Trapeznikova, O.N., Zverev, A.V. *Opyt distantsionnogo monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov po trasse truboprovodnykh sistem (Vostochnaya Sibir')* [Experience of remote monitoring of hazardous geological processes along the route of pipeline systems (Eastern Siberia)]. *Geoekologiya*, 2018, no. 6, pp. 50–58. (in Russian)
4. Viktorov, A.S., Kapralova, V.N., Arkhipova, M.V. *Modelirovanie razvitiya morfologicheskoi struktury erozionno-termokarstovykh ravnin s ispol'zovaniem materialov distantsionnykh s'emok* [Modeling the development of the morphological structure of erosion-thermokarst plains using remote sensing data]. *Issledovanie Zemli is kosmosa*, 2019, no. 2, pp. 55–64. (in Russian)
5. Likhvidov, A.A., Chernomurov, M.V., Grishin, V.V. *Metodicheskii apparat tematiceskogo deshifirovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli v koridore magistral'nykh gazorprovodov* [Methodological apparatus for thematic interpretation of remote sensing data of the earth in the corridor of main gas pipelines]. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*. 2013, no. 1, pp. 124–129. (in Russian)
6. *Metodicheskoe rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskoi s'emke masshtaba 1:200000* [Methodical guide for engineering-geological survey of scale 1:200000]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 393 p. (in Russian)
7. *Metody distantsionnogo zondirovaniya Zemli pri reshenii prirodosurnykh zadach* [Methods of remote sensing of the Earth in solving natural resource problems]. Morozov, A.F., Pertsov, A.V., Eds. St. Petersburg, VSEGEI Publ. 2004. (in Russian)
8. Nikolaev, G.B., Illarionov, V.A., Weiss, K.E. *Primeniye distantsionnykh s'emok pri proektirovanii i stroitel'stve lineinykh sooruzhenii v usloviyakh Evropeiskogo Severa* [The use of remote sensing in the design and construction of linear structures in the European North]. *Vestnik instituta geologii Komi NTs UrO RAN*, 2011, no. 11, pp. 20–23. (in Russian)
9. Pupyrev, M.A. *Deshifirovanie i indikatsiya sovremennykh ekzogennykh protsessov v geokriologicheskoi monitoringe kriolotozony* [Deciphering and indication of modern exogenous processes in permafrost geocryological monitoring]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 4, pp. 67–75. (in Russian)
10. Pupyrev, M.A., Ivanov, O.E. *GIS-analiz inzhenerno-geokriologicheskikh uslovii osvoeniya zapadnogo Yamala na osnove priemov landshaftnoi indikatsii* [GIS analysis of engineering and geocryological conditions for the development of western Yamal on the basis of landscape indication techniques]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 215–222. (in Russian)
11. Satdarov, A.Z. *Metody issledovaniya regressivnogo rosta ovragov: dostoinstva i nedostatki* [Methods for studying the regressive growth of ravines: advantages and disadvantages]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki*. 2016, vol. 158, no. 2, pp. 277–292. (in Russian)
12. Sergeev, D.O., Perlshtein, G.Z., Khimenkov, A.N., Khalilova, Yu.V., Ugarov, A.N. *Aerovisual surveys to assess the hazard of exogenous geological processes along the main oil pipeline route (Chapter 13). Bezopasnost' Rossii. Pravovue, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Bezopasnost' sredstv khraneniya i ucheta energoresursov* [Safety of Russia. Legal, socio-economic and scientific and technical aspects. Safety of means of storage and transport of energy resources]. Moscow, Znanie Publ., 2019, pp. 295–309. (in Russian)
13. Slagoda, E.A., Ermak, A.A. *Deshifirovanie ekzogennykh protsessov tipichnykh tundr poluostrova Yamal na primere territorii raiona srednego techeniya reki Yuribei* [Deciphering the exogenous processes of typical tundra of the Yamal Peninsula on the example of the territory of the middle reaches of the Yuribei river]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, ser. Nauki o Zemle*, 2014, no. 4, pp. 28–38. (in Russian)
14. Kholodilov, I.V. *Kompleksnoe kartografirovaniye etalonykh zonal'nykh struktur na osnove analiza dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Complex mapping of reference zonal structures based on the analysis of remote sensing data]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 3, pp. 29–35 (in Russian).
15. Yakutin, M.V., Puchnin, A.N. *Monitoring termokarstovykh obrazovaniy v tsentralnoi Yakutii s ispol'zovaniem metodov distantsionnogo zondirovaniya* [Monitoring of thermokarst formations in central Yakutia using remote sensing methods]. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 120–124. (in Russian)
16. Liljedahl, A.K. et al. *Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology*. *Nature geoscience*, 2016, pp. 1–8.
17. Boike, J., Yoshikawa, K. *Mapping of Periglacial Geomorphology using Kite // Balloon Aerial Photography*. *Permafrost and periglacial processes*, 2003, vol. 14, pp. 81–85.
18. Sannel, A.B.K., Brown, I.A. *High-resolution remote sensing identification of thermokarst lake dynamics in a subarctic peat plateau complex*. *Canadian J. of Remote Sensing*. 2010, vol. 36, no. 1, pp. S26–S40.
19. Eroglu, H. et al. *Using high resolution images and elevation data in classifying erosion risks of bare soil areas in the Hatila Valley Natural Protected Area, Turkey*. *Stoch. Environ. Risk Assess.*, 2010, no. 24, pp. 699–704.
20. Günther F. et al. *Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction*. *The Cryosphere*. 2015, no. 9, pp. 151–178.
21. Hinke, K.M. et al. *Methods to assess natural and anthropogenic thaw lake drainage on the western Arctic coastal plain of northern Alaska*. *Journal of geophysical research*, 2007, vol. 11, F02S16.
22. Liu, L., Schaefer K., et al. *Seasonal thaw settlement at drained thermokarst lake basins, Arctic Alaska*. *The Cryosphere*, 2014, no. 8, pp. 815–826.
23. Ulrich, M., Grosse, G., Strauss, J., Schirmeister, L. *Quantifying wedge-ice volumes in Yedoma and thermokarst basin deposits*. *Permafrost and periglacial processes*. 2014.
24. Viktorov, A.S., Orlov, T.V., Kapralova, V.N., Trapeznikova, O.N., Sadkov, S.A., Zverev, A.V. *Stochastic modeling of human-induced thermokarst and natural risk assessment for existing and planned engineering structures*. *Natural Hazards and Risk Research in Russia*. Svalova, V., Ed. 2019, Springer, Cham, pp. 219–239.