СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2021

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на Балканах (землетрясения в Хорватии 2020 г.)

Н. И. Фролова, И. П. Габсатарова, С. П. Сущев, А. Н. Угаров, Н. С. Малаева 3

Сейсмичность России в 2020 году

А. А. Маловичко, М. В. Коломиец, А. И. Рузайкин 22

Новый подход к выделению границ засоленных мерзлых пород Арктического побережья

Ю. В. Черняк, А. А. Фалалеева, А. В. Брушков 34

Природно-техногенные геоэкологические опасности в городе: формирование, динамика, воздействие

В. Г. Заиканов, Т. Б. Минакова, Е. В. Булдакова 45

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Определение числа структурных контактов в дисперсных глинистых грунтах

Ф. С. Карпенко, К. Н. Абросимов, О. В. Сереброва 60

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика создания комплекса математических моделей зоны аэрации и насыщенной зоны для прогноза миграции загрязнения от приповерхностного источника до области разгрузки

Е. В. Кононченко, А. Б. Петраш 72

Инженерная геофизика при исследовании зон подработок даек березитов

А. В. Кузин, Э. Х. Гадельшина, И. О. Борисов 87

РЕЦЕНЗИИ

Рецензия на коллективную монографию “Геологический риск урбанизированных территорий”

А. А. Лаврусевич 94

Contents

Number 5, 2021

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Calibration of seismic intensity attenuation model for the Balkan region (the 2020 earthquakes in Croatia)

N. I. Frolova, I. P. Gabsatarova, S. P. Suchshev, A. N. Ugarov, N. S. Malaeva 3

Seismicity of Russia in 2020

A. A. Malovichko, M. V. Kolomiets, A. I. Ruzaykin 22

A new approach to outlining boundaries of saline frozen deposits on the Arctic coast

Yu. V. Cherniak, A. A. Falaleeva, A. V. Brouchkov 34

Natural and human-induced geoenvironmental hazards in the city: formation, dynamics and impact

V. G. Zaikanov, T. B. Minakova, E. V. Buldakova 45

SOIL AND ROCK ENGINEERING

Calculation of the number of structural contacts in clay disperse soils

F. S. Karpenko, K. N. Abrosimov, O. V. Serebrova 60

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Development of the mathematical model set for unsaturated and saturated zones for predicting contaminant transport from a near-surface source to a discharge area

E. V. Kononchenko, A. B. Petrash 72

Engineering geophysics for the study of undermined zones around beresite dykes

A. V. Kuzin, E. Kh. Gadel'shina, I. O. Borisov 87

BOOK REVIEW

Review of the collective monograph “Geological risk of urbanized areas”

A. A. Lavrusevich 94

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 3–21

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА БАЛКАНАХ (ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ХОРВАТИИ 2020 г.)

© 2021 г. Н. И. Фролова[1,*], И. П. Габсатарова[2,], С. П. Сущев[3,***], А. Н. Угаров[3], Н. С. Малаева[1]**

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

[2] Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба РАН" (ФИЦ ЕГС РАН), Ленина пр., д. 189, Обнинск, Калужская обл., 249035 Россия

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

**E-mail: frolovanina7@gmail.com*

*** E-mail: ira@gsras.ru*

****E-mail: garo@esrc.ru*

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.
После доработки 29.05.2021 г.
Принята к публикации 09.06.2021 г.

Проведены исследования, направленные на калибровку параметров модели макросейсмического поля в одной из зон на Балканах по материалам землетрясений 2020 г. в Хорватии. Зона расположена в пределах континентального района Хорватии, находящегося на границе Динаридов и Южной части Паннонского бассейна, входящих в Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс. При исследовании производилось сравнение наборов параметров макросейсмического поля, полученных при калибровке модели в другом районе этого пояса, расположенном на Кавказе и имеющем схожие черты тектонического развития. Для более точной оценки последствий землетрясений рассматривались оперативные сообщения нескольких сейсмологических центров, а для учета направленности излучения и выбора сейсмогенного разлома земной коры – механизмы очагов. Выполнен сравнительный анализ наблюденных и расчетных значений сейсмической интенсивности, полученных с помощью системы "Экстремум". Полученные результаты калибровки дополнили Базу данных, используемую для эффективной оперативной оценки последствий землетрясений, и будут применяться системой "Экстремум" при возникновении разрушительных землетрясений в районе Балканского полуострова.

Ключевые слова: *оперативные оценки потерь в случае землетрясений, калибровка модели макросейсмического поля, районы аналоги, Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс, информационная система "Экстремум"*

DOI: 10.31857/S0869780921050040

ВВЕДЕНИЕ

25 лет минуло со дня смерти Николая Виссарионовича Шебалина – Ученого, посвятившего свою яркую творческую научную деятельность исследованию макросейсмического поля и очагов сильных землетрясений мира. Высокосейсмичные Балканы относятся к числу районов, в которых под его руководством выполнен научный проект ЮНДП/ЮНЕСКО "Исследование сейсмичности Балканского региона", составлены каталоги исторических (до 1901 г.) и относительно современных землетрясений 1901–1970 гг., а также уникальный Атлас карт изосейст сильнейших землетрясений Балканского региона. Анализ собранных макросейсмических данных позволил выявить закономерности затухания в регионе и определить границы подзон с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля. Полученные результаты востребованы и в настоящее время, в частности, хорватскими сейсмологами при анализе сейсмичности и описании макросейсмического эффекта от сильных землетрясений на территории Хорватии и ее окружения [26, 29]. Добавим, что в других регионах Евразии, развитием установленного закона затухания на данных современных землетрясений и калибровкой его

параметров занимаются многие российские исследователи, назовем лишь несколько последних работ [9, 10, 12, 5, 6, 16]. Эти исследования обеспечивают выполнение калибровки математических моделей, позволяющих с высокой точностью прогнозировать параметры макросейсмического поля в зависимости от координат эпицентра и магнитуды. По координатам подтверждается факт попадания эпицентра в зону, для которой заблаговременно в процессе калибровки вычислены параметры затухания, включающие коэффициенты уравнения Н.В. Шебалина, зависящие от расстояния и направления от эпицентра до точки наблюдения. Зависимость затухания от направления на точку позволяет формировать анизотропное поле интенсивностей, достаточно детально описывающее реальные сейсмические проявления.

В работе [12] описаны результаты исследования, направленные на калибровку системы на основе анализа параметров сильных землетрясений в 2019 г. в другом районе Балкан – Албании. Была показана приемлемость применения при моделировании макросейсмического поля в оперативном режиме одинаковых параметров математической модели для районов-аналогов Альпийско-Гималайского пояса (отдельных зон на Кавказе и Балканах), выделенных на основе общих сейсмотектонических признаков. Такая возможность позволяет считать близкими по своим значениям коэффициенты закона затухания, отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов и ориентацию макросейсмического поля, заданную азимутом оси вытянутости изосейст. Сделан вывод, что необходимо продолжение работ по калибровке макросейсмического поля, а также по установлению зон-аналогов со схожими сейсмотектоническими условиями, что, несомненно, будет способствовать формализации и ускорению процесса использования макросейсмической информации в службах МЧС для эффективного расчета возможных потерь от сильных землетрясений в реальном масштабе времени.

В 2020 г. вновь зафиксирована активизация уже в северной части Балканской зоны, где произошло два сильных землетрясения в Хорватии: 22 марта с $M = 5.5$ и интенсивностью VII–VIII баллов по шкале MSK [35]; 29 декабря с $M = 6.3$, при котором колебания грунта достигали интенсивности VIII–IX баллов по шкале EMS [36]. Оба землетрясения стали причиной значительных разрушений народнохозяйственных объектов. Первое из названных землетрясений произошло в густонаселенном районе, вблизи г. Загреб – столицы Хорватии. Второе, еще более сильное по магнитуде землетрясение, произошло южнее, но также в обжитой континентальной части Хорватии, где длительное время не происходило столь сильных землетрясений. Оба землетрясения детально описаны, что позволило использовать их для калибровки системы “Экстремум” в Балканской зоне.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория Хорватии принадлежит широкой пограничной зоне между Африкой и Евразией, на которую влияет конвергенция Африканской и Евразийской плит. В рассматриваемой геотектонической зоне расположено несколько отдельных структур: Паннонский бассейн, Восточные Альпы, Динариды, переходная зона между Динаридами и Адриатической платформой, а также сама Адриатическая платформа [13]. Сейсмическая активность на стыке Адриатического, Альпийско-Паннонского и Динарского блоков, вероятно, вызвана независимым движением Адриатической микроплиты. Континентальная часть Хорватии занимает территорию самой западной части Динаридов и южной части Паннонского бассейна.

Опубликован представительный ряд работ, отражающих проявления сейсмичности в Хорватии [26, 28–30, 33–35 и др.]. В табл. 1 перечислены сильнейшие землетрясения, а также указаны параметры изосейст ряда исторических землетрясений (эллиптичность (сжатие) и азимут простирания большой оси) по [37, 38], которые важны при калибровке и будут использованы в настоящей работе.

Из обширного материала приведем необходимый короткий обзор, который показывает значимость работ в этом районе. В проявлении сейсмичности на территории Хорватии выделяются несколько сейсмоактивных зон: “Загреб”, “Ново-Место-Кршко”, “Карловац-Метлика” и “Покупско-Петринья”. Среди них в связи с проявлением активизации в 2020 г. наиболее интересны две – “Загреб” (1 на рис. 1) и “Покупско-Петринья” (2 на рис. 1). Самая важная из них – сейсмическая зона Загреба, охватывает горы Медведница и собственно г. Загреб с прилегающими территориями. Эпицентры сильнейших землетрясений в этой зоне в основном расположены на северо-западных склонах гор Медведница.

Сильнейшее землетрясение, известное как “Великое землетрясение в Загребе”, произошло 9 ноября 1880 г. недалеко от Кашины, в деревне Планина. Это было первое землетрясение в Хорватии, для которого значение очаговой глубины (16 км) было определено на основе макросейсмических исследований. Анализ эффектов землетрясения позволил определить эпицентральную интенсивность (VIII MSK-64). Макросейсмиче-

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения в Хорватии (с XVII в. по 2019 г.) по данным сейсмологической службы Хорватии и [33, 34]

Дата	Место	Магнитуда	Интенсивность MSK	Эллиптичность ε, сжатие k, азимут ζ по [37, 38]*
6 апреля 1667	Дубровник	–	IX–X	–
9 ноября 1880	Загреб	6.3	VIII	–
2 июля 1898	Триль	–	IX	–
17 декабря 1905	Загреб	<4.6	–	ε = 0.873, k = 1.145, ζ = 48°
2 января 1906	Загреб	5.8	–	ε = 0.695, k = 1.438, ζ = 169°
8 октября 1909	Покупле	5.8	VIII	ε = 0.749, k = 1.335, ζ = 149°
12 марта 1916	Винодол	5.8	VIII	ε = 0.664, k = 1.506, ζ = 142°
27 марта 1938	Новиград-Подравски	5.6	VIII	ε = 0.823, k = 1.215, ζ = 88°
29 декабря 1942	Имотски	6.2	VIII–IX	ε = 0.999, k = 1.001, ζ = 11°
11 января 1962	Макарска	6.1	VIII–IX	ε = 0.938, k = 1.066, ζ = 99°
13 апреля 1964	Диль Гора	5.7	VIII	ε = 0.740, k = 1.351, ζ = 162°
5 сентября 1996	Стон Слано	6.0	VIII	–

* в статье приводятся сведения за период с 1901 по 1995 гг.

ский эффект от землетрясения хорошо задокументирован из-за значительного материального ущерба. Из 3670 зданий (в Загребе в то время было около 30 тыс. жителей) все были повреждены, а около 13% полностью разрушены. В Атласе [40] приведена карта с изосейстами балльности этого землетрясения. Через 140 лет после Великого Загребского землетрясения в районе г. Загреба и произошло землетрясение 22 марта 2020 г. [35], информация по которому использована нами для задачи калибровки системы “Экстремум”.

Другая интересующая нас сейсмическая зона – Покупско-Петринская, простирающаяся с севера на юг (2 на рис. 1) почти перпендикулярно Загребской зоне. Сильнейшее событие – Покупское землетрясение, произошедшее 8 октября 1909 г. с эпицентром в 9 км севернее г. Покупско, – одно из самых известных землетрясений не только в Хорватии, но и во всей Европе. Его магнитуда определена как M = 5.8, глубина очага h = 14 км, а вызванные им эффекты были оценены с максимальной интенсивностью VIII MSK-64. До конца 1910 г. произошло еще более 50 афтершоков этого землетрясения, самый сильный из которых имел магнитуду M = 5.3, после 1910 г. других землетрясений, превышающих M = 4.5, не было зафиксировано.

Покупское землетрясение – одно из немногих исторических землетрясений, которые регулярно упоминаются в учебниках по сейсмологии и других книгах по истории науки, поскольку его изучение привело к важным открытиям, которые стали поворотным моментом в понимании землетрясений и их последствий, а также строения Земли. Анализируя землетрясение, известный хорватский ученый и геофизик Андрия Мохоровичич доказал существование скачка скорости продольных сейсмических волн на границе, отделяющей земную кору от мантии Земли (граница Мохоровичича).

ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ И УЧЕТ ТИПА МАГНИТУДЫ СОБЫТИЯ

В настоящей статье для калибровки параметров модели макросейсмического поля используется ранее разработанная авторами процедура [9, 11, 12], предусматривающая подбор приемлемых, устойчивых для рассматриваемой территории значений параметров математической модели затухания сейсмической интенсивности. В качестве таких параметров предложено использовать:

– коэффициенты уравнения b, ν, c макросейсмического поля [14]:

$$I = bM - \nu\log\sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \qquad (1)$$

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

– отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов, названное коэффициентом сжатия k;

– угол, задающий ориентацию макросейсмического поля, в частности, азимут большой оси эллипса вытянутости изосейст.

Калибровка является итерационным и довольно сложным циклическим процессом, включающим уточнение границ зон и вычисление для них приемлемых квазистабильных параметров, по-

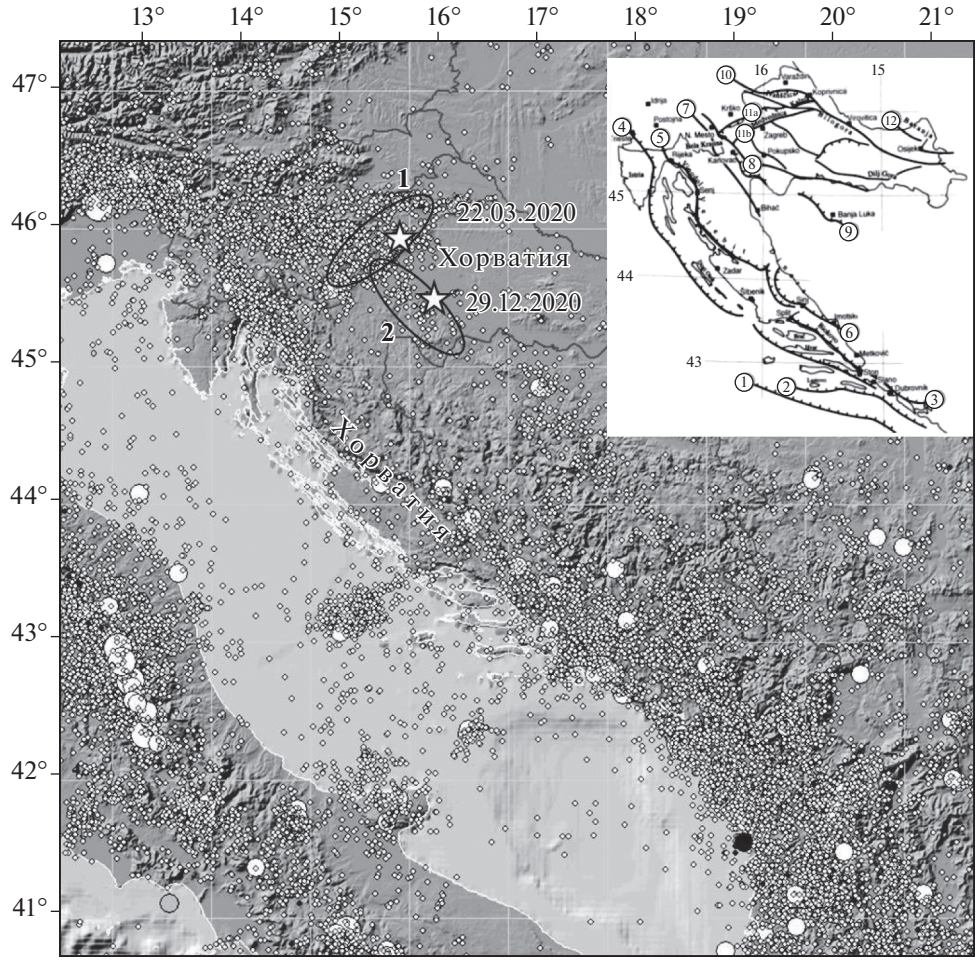


Рис. 1. Сейсмичность Хорватии и прилегающих областей по данным ФИЦ ЕГС РАН и NEIC USGS. Условные обозначения: белые круги – эпицентры землетрясений: маленькие – $M \le 5.5$, большие – с $M \ge 6$; черные эллипсы – сейсмические зоны: 1 – "Загреб", 2 – "Покупско-Петринья"; звездочки – сильнейшие землетрясения 22 марта 2020 г. и 29 декабря 2020 г., исследуемые в настоящей статье. На врезке представлена схема глубинных разломов на территории Хорватии по [34]: 1 – Адриатический, 2 – Дубровниковский, 3 – Мозор-Биоковский: 4 – Триесто-остров Дуги-Оток; 5 – Рийека-Велебит; 6 – Синьи-Имостски; 7 – Фелла-Сава-Хрономели-Бихас; 8 – Южный краевой разлом Паннонской впадины; 9 – Банья-Лука; 10 – Периадриатис-Драва; 11 – зона разломов гор Медведница: a – Брезик–Кризевский; b –Загребский; 12 – Баранья.

этому по мере накопления данных о новых событиях калибровочные действия должны повторяться.

Ранее авторами были изучены особенности затухания для отдельных зон на территории РФ и сопредельных стран [10–12]. Для территории Кавказа для калибровки использовались сведения об ощутимости 32 сильных землетрясений с $I \ge 6$ баллов по шкале MSK-64 за период 1966–2012 гг. В процессе калибровки определялись координаты населенных пунктов, рассчитывались удаления пунктов от макросейсмических эпицентров, строились графики затухания. Для каждого землетрясения рассчитаны индивидуальные параметры макросейсмического поля, которые впоследствии использовались для вычисления средних параметров для зоны. При определении ориентации макросейсмического поля и коэффициентов сжатия эллипса k в качестве основы использовалась информация с карты ОСР-97 о доменах и сейсмолинеаментах [1, 8].

В результате исследований были установлены стабильные параметры макросейсмического поля для района, границы которого включают территорию Дагестанского клина с продолжением на северо-запад от 48°E до 45.5°E. Для выделенной зоны рекомендован следующий набор стабильных параметров поля: $b = 1.5$; $\nu = 3.62$; $c = 3.16$; $k = 1.6$; ориентация поля в соответствии с полем разломов.

Выполненные с использованием полученных параметров поля контрольные расчеты для Дагестанского (14.05.1970 г.) и Курчалойского (11.10.2008 г.) землетрясений показали эффектив-

ность калибровки моделей ИС “Экстремум” [11]. В целом, погрешность в определении интенсивности не превысила 0.3–0.5 балла. Значения погрешностей $\Delta I_{ср}$ в прогнозировании интенсивности от контрольных землетрясений варьировало от 0.1 на эпицентральных расстояниях меньше 25 км и до 0.3 на расстояниях более 100 км.

В статье [12] представлена возможность использования полученных откалиброванных параметров макросейсмического поля для района на Кавказе, входящего в Альпийско-Гималайский сейсмоактивный пояс, для районов-аналогов со схожими сейсмотектоническими условиями. Применение полученного для Кавказа набора откалиброванных параметров поля при расчете последствий землетрясений 26.11.2019 г. в Албании, имеющего схожие черты тектонического развития, показало целесообразность использования подхода, основанного на выявлении районов-аналогов, в качестве первого итерационного шага для повышения надежности оперативных оценок потерь в случае сильного землетрясения.

Для исследования применимости полученных стабильных параметров поля на Кавказе к другой территории, принадлежащей к Альпийско-Гималайскому поясу, выполнены расчеты последствий землетрясения 22 марта и 29 декабря 2020 г. в Хорватии. При анализе результатов особое внимание было уделено правильному учету типа магнитуд, рассчитываемых различными службами в оперативном режиме [3], и используемым в системе “Экстремум” для оперативной оценки последствий.

Особенно остро эта проблема встает при расчетах макросейсмической интенсивности в конкретных населенных пунктах с использованием уравнения макросейсмического поля от землетрясений умеренных магнитуд ($M = 5.0 \pm 0.5$). Это обусловлено тем, что, как установлено в [31] и представлено в части 3 Руководства обсерваторской практики [21], при таких магнитудах наблюдаются существенные отклонения зависимости *Ms* в соотношении с *ML* и *Mw*, определяемые в последние годы в сейсмологических центрах при оперативной обработке. Рассмотрим несколько подробнее этот вопрос.

Напомним, что в расчете макросейсмической интенсивности $I(M, \Delta, h)$ с использованием уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина изначально заложены оценки магнитуд по поверхностной волне (современное название *Ms*). В исследованиях по калибровке, как правило, основываются на довольно сильных землетрясениях ($Ms \geq 6.0$), так как именно они вызывают разрушительный эффект. Но бывают случаи, когда при неглубоком залегании очага землетрясения с $M = 5.0–5.5$ достигают интенсивности в VII и более баллов. Как раз такое характерно для Загребской зоны Хорватии.

На современном этапе во многих европейских региональных сейсмологических центрах распространена количественная мера силы землетрясения через использование локальной магнитуды *ML*, введенной Рихтером [39] и широко используемой при условии учета затухания энергии сейсмических волн конкретно для определенного района. В [19] на основе параметрического анализа Европейского интегрированного архива данных (EIDA) подтверждено более сильное затухание для сетей, работающих в районе Средиземного моря, таких как итальянские и греческие сети, по сравнению с сетями, расположенными в континентальной Европе. Случайные эффекты, зависящие от сети, позволили количественно оценить межсетевую изменчивость для разных сетей, работающих в одном регионе или стране. Наблюдаемая межсетевая изменчивость находится в пределах ± 0.2 магнитудных единицы.

Поскольку *ML* часто вычисляется сейсмологическими обсерваториями для измерения размеров местных землетрясений, она появляется в эмпирических соотношениях для преобразований, применяемых для создания каталогов с однородной магнитудной оценкой, особенно для таких приложений, как оценка сейсмической опасности [25]. Хотя локальная магнитуда *ML* была введена как эмпирический параметр, не представляющий каких-либо конкретных характеристик источника, было показано, что она связана с падением напряжения и скоростью разрушения [22] и масштабируется в зависимости от энергии [32, 33]. Таким образом, *ML* вызвала интерес в недавних исследованиях, посвященных изменчивости движения грунта, поскольку она лучше, чем моментная магнитуда *Mw*, отражает высокочастотную изменчивость сотрясений грунта для землетрясений средней силы [18, 20, 23].

Заметим, что в мировой практике со времен проекта Global Seismic Hazard Assessment Program для оценки сейсмической опасности все чаще используется моментная магнитуда *Mw*, рассчитываемая через сейсмический момент [17].

Применительно к Хорватии в работе [27] проведено исследование по установлению связи между значениями магнитуд *ML* и *Mw*. Установлено, что между ними в среднем существует линейная (почти 1:1) зависимость, и это облегчает работы по составлению каталога по какой-либо одной унифицированной магнитуде – *ML* или *Mw*.

Однако, для наших задач, решение которых основано на использовании уравнения макросейсмического поля Н.В. Шебалина (1), необходимо перевести эти магнитуды в магнитуду по поверхностной волне *Ms*. Для сильных землетрясений с $8 \geq Mw \geq 6$ на основе установленного Канамори

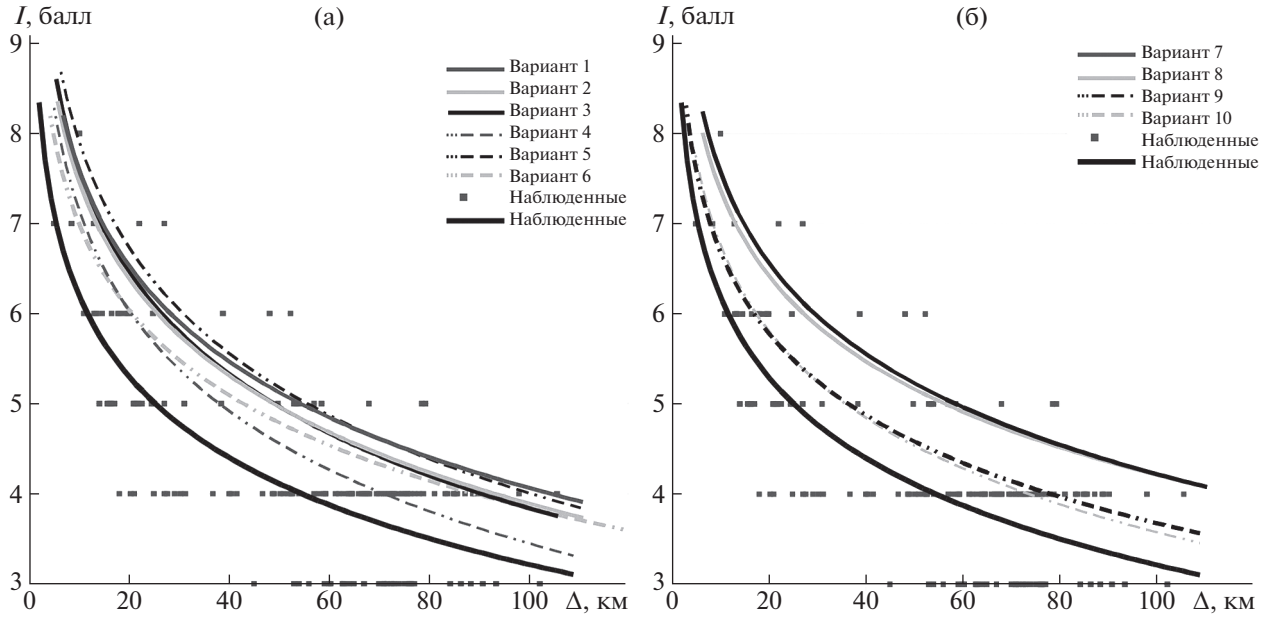


Рис. 2. Сравнение расчетной и наблюденной интенсивностей: а – варианты 1–6; б – варианты 7–10 (см. табл. 2).

соотношения расхождения между *Ms* и *Mw* незначительны, и ими можно пренебречь. Этого нельзя сказать про землетрясения умеренной силы ($5 \geq Mw \geq 3$). Воспользуемся снова принципом аналогии для одного из районов Альпийско-Гималайского комплекса – Кавказа. В названном регионе по спектрам землетрясений умеренных и слабых магнитуд определяются сейсмические моменты M_0 и рассчитываются значения *Mw* [2]. В этой работе найдено соотношение между шкалами *Mw* и *Ms* для Кавказа в интервале магнитуд *Ms* от 2.2 до 7.3. В работе использовались данные каталогов GCMT за 1976–2014 гг. (http://www.globalcmt.org/) для моментных магнитуд, Геологической службы США NEIC (http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php) для магнитуд по поверхностным волнам, а также каталога с определением энергетических классов K_P и спектральных магнитуд *Mw* для отдельных слабых землетрясений с $3.8 \leq MS \leq 5.1$ в регионе Северного Кавказа. Получено соотношение:

$$Mw = (0.876 \pm 0.102)Ms + 0.774 \pm 0.441, \quad R \approx 0.865, \ (2.2 \leq Ms \leq 5.3), \qquad (2)$$

где R – коэффициент корреляции.

Оно показывает, что $Ms = 4.8$ при $Mw = 5.0$. Однако, авторы статьи, отдавая себе отчет о недостаточно представительной выборке для уверенного анализа, оставляют за собой право улучшения этой зависимости после накопления материала по исследуемому району. В нашем же исследовании мы воспользуемся этой формулой при моделировании последствий землетрясения 22 марта 2020 г. в Хорватии.

МОДЕЛИРОВНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 22 МАРТА 2020 ГОДА

Для исследования применимости полученных ранее стабильных параметров поля для района-аналога на Кавказе к территории, принадлежащей к Альпийско-Гималайскому поясу, выполнены расчеты последствий землетрясения 22.03.2020 г. в Хорватии. В табл. 2 приведены варианты исходных данных для расчета последствий с помощью системы “Экстремум”. Расчеты выполнялись для параметров события, определенных разными сейсмологическими службами, и параметров макросейсмического поля по [11, 12, 40, 41]. В качестве коэффициента сжатия *k* использовалось значение 1.5, как максимальное из значений, установленное здесь [37, 38]. Рассматривались разные ориентации поля в соответствии с решением механизма очага по данным сейсмологических служб: 263° (в соответствии с https://earthquake.usgs.gov; [32]; http://mseism.gsras.ru) и 57° (в соответствии с http://www.globalcmt.org). Расчетные значения интенсивности сравнивались с наблюденными значениями, опубликованными на сайте Геологической службы США (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008dx7-/dyfi/intensity).

На рис. 2а приведены результаты расчета интенсивности сотрясений *I* для параметров очага по данным:

– Российской службы ЕГС РАН (http://mseism.gsras.ru) – вариант 1;

– Европейской сейсмологической службы (https://www.emsc-csem.org) – вариант 2;

Таблица 2. Варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения в Хорватии 22.03.2020 г.

№	Параметры события	Коэффициенты уравнения макросейсмического поля	Ориентация поля и коэффициент сжатия k
1	45.98; 15.99° E; mb = 5.5; h = 10 км, http://mseism.gsras.ru	b = 1.5; ν = 4; c = 3.8; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	263°; k = 1.5
2	45.87°N; 16.02°E; Mw = 5.4; h = 10 км, https://www.emsc-csem.org	Те же	Те же
3	45.9°N; 15.97°E; Mw = 5.4; h = 10 км, https://earthquake.usgs.gov	– “ –	– “ –
4	45.85°N; 15,.95°E; M = 5.1; h = 8.83 км, http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	– “ –	– “ –
5	45.8773°N, 16.0208°E; ML = 5.5, h = 8.83 км, https://www.pmf.unizg.hr	– “ –	– “ –
6	45.79°N; 16.07°E; Ms = 5.3; h = 12 км, Global CMT Catalog	– “ –	– “ –
7	45.8773°N, 16.0208°E; ML = 5.5, h = 8.83 км, https://www.pmf.unizg.hr	b = 1.8; ν = 3.5; c = 1.4; Балканский регион ($h \le 10$ км) [40, 24]	– “ –
8	Те же	Те же	57°; k = 1.5
9	45.85°N; 15.95°E; M = 5.1; h = 8.83 км, http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	– “ –	263°; k = 1.5
10	Те же	Те же	57°; k = 1.5
11	45.8773°N, 16.0208°E; ML = 5.5, h = 8.83 км, https://www.pmf.unizg.hr	b = 1.52; ν = 3.62; c = 3.16; Откалиброванные для зоны на Кавказе [11]	263°; k = 1.5
12	45.85°N; 15.95°E; M = 5.1; h = 8.83 км; http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	Те же	Те же
13	Те же	b = 1.5; ν = 3.5; c = 3.0; Шебалин – по умолчанию [15]	– “ –
14	45.79°N; 16.07°E; Ms = 5.3; h = 12 км, http://www.globalcmt.org	b = 1.5; ν = 4.5; c = 4.5; Балканский регион (h >10 км) [40, 24]	– “ –
15	45.8773°N, 16.0208°E; Ms = 5.0 h = 8.83 км, https://www.pmf.unizg.hr	b = 1.5; ν = 4; c = 3.8; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	– “ –
16	Те же	b = 1.52; ν = 3.62; c = 3.16; откалиброванные для зоны на Кавказе [11]	– “ –
17	45.85°N; 15.95°E; M = 5.0; h = 8.83 км http://terremoti.ingv.it/en/event/24134961	b = 1.5; ν = 4; c = 3.8; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	– “ –
18	Те же	b = 1.52; ν = 3.62; c = 3.16; откалиброванные для зоны на Кавказе [11]	– “ –
19	45.79°N; 16.07°E; Ms = 5.3; h = 12 км, http://www.globalcmt.org	Те же	– “ –

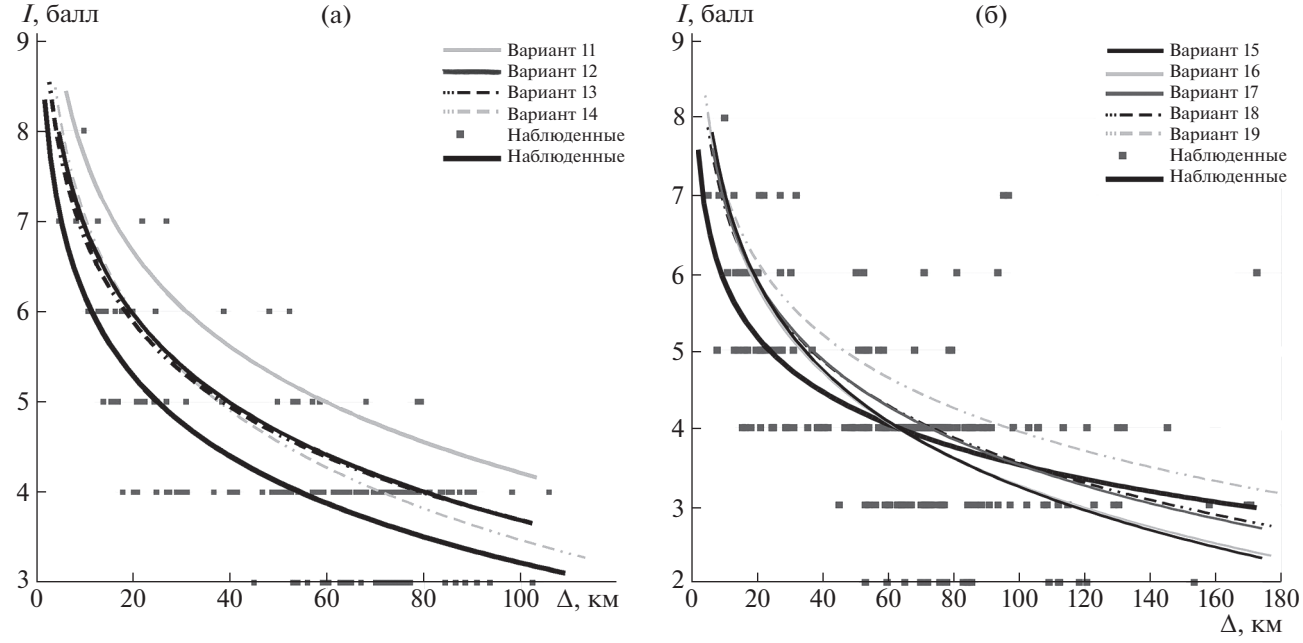


Рис. 3. Сравнение расчетной и наблюденной интенсивностей: а – варианты 11–14; б – варианты 15–19 (см. табл. 2).

– Геологической службы США (https://earthquake.usgs.gov) – вариант 3;

– Сейсмологической службы Италии (http://terremoti.ingv.it) – вариант 4;

– Сейсмологической службы Хорватии (https://www.pmf.unizg.hr) – вариант 5;

– по данным каталога GCMT (http://www.globalcmt.org – вариант 6.

Расчеты выполнены для обобщенных региональных коэффициентов макросейсмического поля для Центральной Юго-Восточной Европы [41] при $k = 1.5$, ориентации изосейст под углом 263° в соответствии с решением механизма очага Геологической службой США (https://earthquake.usgs.gov).

Во всех вариантах наблюдается завышение расчетных значений интенсивности по сравнению со значениями интернет-интенсивности, определяемой по информации об ощутимости землетрясения на основе заполненных жителями интерактивных анкет на сайте Геологической службы США. На расстояниях до 40 км превышение составляет 0.1–0.3 балла, на больших расстояниях достигает 1 балла. Наименьшее расхождение наблюдается при использовании параметров сейсмологической службы Италии (вариант 4). Использование в расчетах региональных коэффициентов поля для Балканского региона для событий с глубинами $h \le 10$ км по-прежнему дает завышение расчетных значений, которые при использовании параметров очага по данным сейсмологической службы Италии на всех эпицентральных расстояниях варьируют от 0.1 до 0.3 балла.

Ориентация под углом 57° в соответствии с решением механизма очага по GCMT и под углом 263° практически не влияет на результаты (рис. 2б). При использовании региональных параметров поля для района-аналога на Кавказе [11] и коэффициентов уравнения для Балканского региона для событий с $h > 10$ км [40] расчетные значения интенсивности не превышают 0.1–0.3 балла, а на дальних расстояниях расхождения уменьшаются (рис. 3а). Как отмечалось ранее, систематическое завышение расчетных интенсивностей может быть связано с типом магнитуды, определяемым разными службами. Поэтому произведен пересчет магнитуд *Mw* и *ML* в *Ms*. На рис. 3б показаны зависимости расчетных и наблюденных интенсивностей для пересчитанных магнитуд *Ms*.

На расстояниях менее 60 км по-прежнему сохраняется незначительное превышение расчетных значений, более 60 км – незначительное занижение. Наилучшая сходимость получена при использовании откалиброванных параметров поля для района аналога на Кавказе и параметров очага Сейсмологической службы Хорватии (вариант 16) и Сейсмологической службы Италии (вариант 18).

Анализ результатов показывает влияние параметров, определенных разными службами, и целесообразность использования пересчитанных значений *Ms* магнитуд. Довольно часто службы используют другие магнитуды (*Mw, ML, mb*) и/или не указывают тип. Поскольку в уравнении

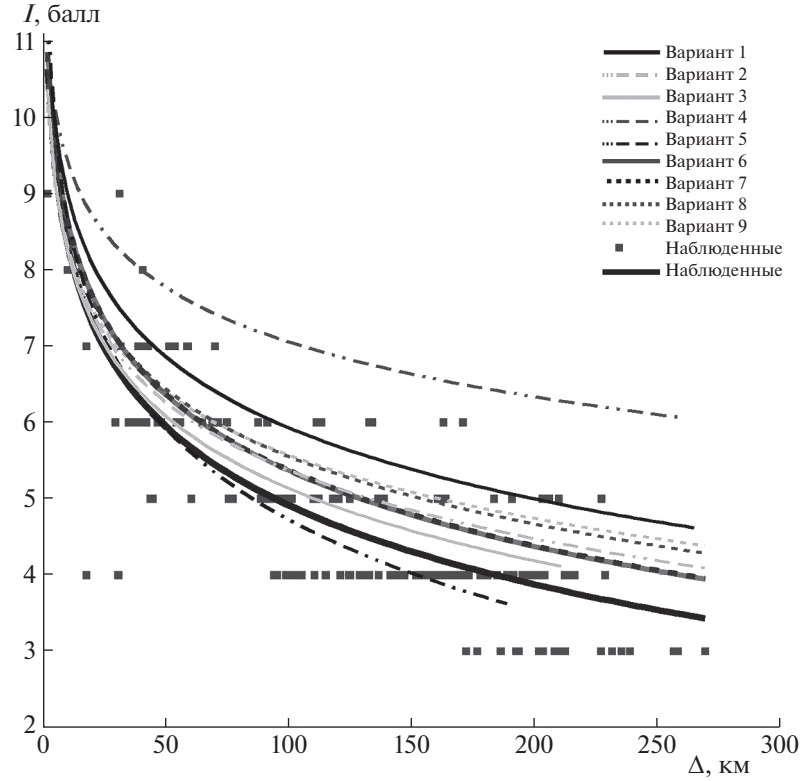


Рис. 4. Сравнение расчетной и наблюденной интенсивностей: варианты 1–9 (см. табл. 3).

Н.В. Шебалина (1) используется *Ms*, то требуется уточнение и пересчет магнитуд.

В целом, можно отметить, что откалиброванные коэффициенты для района-аналога на Кавказе и коэффициенты, предложенные Шебалиным для Центральной и Юго-Восточной Европы (вариант 17), могут успешно применяться для оперативной оценки последствий в Хорватии.

Кроме того, в случае отсутствия данных из региональной службы Хорватии в оперативном режиме, можно вполне воспользоваться данными Сейсмологической службы Италии, которая, как выяснилось в процессе подготовки статьи, представляет параметры землетрясений не только собственно территории Италии, но и обширной, окружающей ее территории, причем делает это оперативно.

МОДЕЛИРОВНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29 ДЕКАБРЯ 2020 ГОДА

Аналогичные исследования применимости полученных стабильных параметров поля для района-аналога на Кавказе к другой территории, принадлежащей к Альпийско-Гималайскому поясу, также выполнены для землетрясения 29 декабря 2020 г. в Хорватии. В табл. 3 приведены варианты исходных данных для расчета последствий с помощью системы “Экстремум”. Расчеты выполнялись для параметров события, определенных разными сейсмологическими службами, и параметров макросейсмического поля по [12, 40, 41]. В качестве коэффициента сжатия k использовались значения от 1.5 до 2.0; рассматривались разные ориентации поля: вдоль разломов и в соответствии с решением механизма очага по данным сейсмологических служб. Расчетные значения интенсивности также сравнивались с наблюденными значениями интернет-интенсивности, опубликованной на сайте Геологической службы США (https://earthquake.usgs.gov).

На рис. 4 приведены результаты расчета интенсивности сотрясений I для параметров очага по данным: ЕГС РАН (http://mseism.gsras.ru) – вариант 1, и Геологической службы США (https://earthquake.usgs.gov) – варианты 2–9. Расчеты выполнены для региональных коэффициентов макросейсмического поля по [11, 41, 40, 24] при $k = 2$ и 1.5, ориентации изосейст вдоль разломов и в соответствии с решением по GCMT.

При использовании параметров очага, полученных в Геологической службе США NEIC, хорошее согласие наблюденных и расчетных интенсивностей на расстояниях до 200 км получено для вариантов 3 и 4. При использовании коэффициентов поля для Центральной и Юго-Восточной

Таблица 3. Варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения в Хорватии 29.12.2020 г.

№	Параметры события	Коэффициенты уравнения макросейсмического поля	Ориентация поля и коэффициент сжатия k
1	45.560°N; 16.170°E; $M = 6.7$; $h = 10$ км, http://mseism.gsras.ru	$b = 1.52$; $\nu = 3.62$; $c = 3.16$; откалиброванные параметры для зоны на Кавказе [11]	Вдоль разломов; $k = 2$
2	45.422°N; 16.225°E; $M = 6.4$; $h = 10$ км, https://earthquake.usgs.gov	Те же	Те же
3	Те же	$b = 1.5$; $\nu = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	– “ –
4	Те же	$b = 1.5$; $\nu = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h > 10$ км) [40, 24]	– “ –
5	Те же	$b = 1.5$; $\nu = 3.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h \le 10$ км) [40, 24]	– “ –
6	– “ –	$b = 1.52$; $\nu = 3.62$; $c = 3.16$; откалиброванные параметры для зоны на Кавказе [11]	$\zeta = 49°$* $k = 2$
7	– “ –	Те же	$\zeta = 224°$** $k = 2$
8	– “ –	– “ –	$\zeta = 132°$***; $k = 2$
9	– “ –	– “ –	$\zeta = 132°$***; $k = 1.5$
10	45.4002°N, 16.2187°E, $M = 6.2$; $h = 11.5$ км, https://www.pmf.unizg.hr	– “ –	$\zeta = 132°$***; $k = 2$
11	Те же	– “ –	$\zeta = 132°$***; $k = 1.5$
12	– “ –	$b = 1.5$; $\nu = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	Те же
13	– “ –	$b = 1.5$; $\nu = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h >$10 км) [40, 24]	– “ –
14	45.38°N; 16.21°E; $Ms = 6.4$; $h = 12$ км, http://www.globalcmt.org	$b = 1.52$; $\nu = 3.62$; $c = 3.16$; откалиброванные параметры для зоны на Кавказе [11]	– “ –
15	Те же	$b = 1.5$; $\nu = 4$; $c = 3.8$; Центральная и Юго-Восточная Европа [41]	– “ –
16	– “ –	$b = 1.5$; $\nu = 4.5$; $c = 4.5$; Балканский регион ($h > 10$ км) [40, 24]	– “ –

* https://ingvterremoti.com/2020/12/29/terremoto-mw-6-2-in-croazia-29-dicembre-2020-ore-1219/

** https://earthquake.usgs.gov

*** http://www.globalcmt.org

Европы (вариант 3) на расстояниях больше 150 км наблюдается незначительное превышение расчетной интенсивности. Использование коэффициентов уравнения поля для Балканского региона при $h > 10$ км (вариант 4) дает незначительное занижение расчетных значений в том же диапазоне расстояний. При использовании откалиброванных параметров поля для зоны на Кавказе [11] и разных ориентаций поля: вдоль разломов (вариант 2) и под углом 49° в соответствии с решением механизма очага Итальянской службой (вариант 6) получены незначительные по сравнению с вариантом 3 превышения расчетных интенсивностей на расстояниях до 150 км. Увеличение разницы между расчетными и наблюденными значениями интенсивности отмечено в вариантах 8 и 9 при использовании ориентации поля под углом 132° в соответствии с решением механизма очага по GCMT. Наибольшее расхождение расчетных и наблюденных интенсивностей при использовании параметров ГС США получено в варианте 5 при использовании параметров поля для Балканского региона при $h \le 10$ км.

При использовании в расчетах параметров события, определенных Хорватской сейсмологической службой (https://www.pmf.unizg.hr), наблюденные и расчетные интенсивности хорошо согласуются на расстояниях до 100 км (рис. 5а). При этом использовались параметры уравнения поля для Центральной и Юго-Восточной Европы (ва-

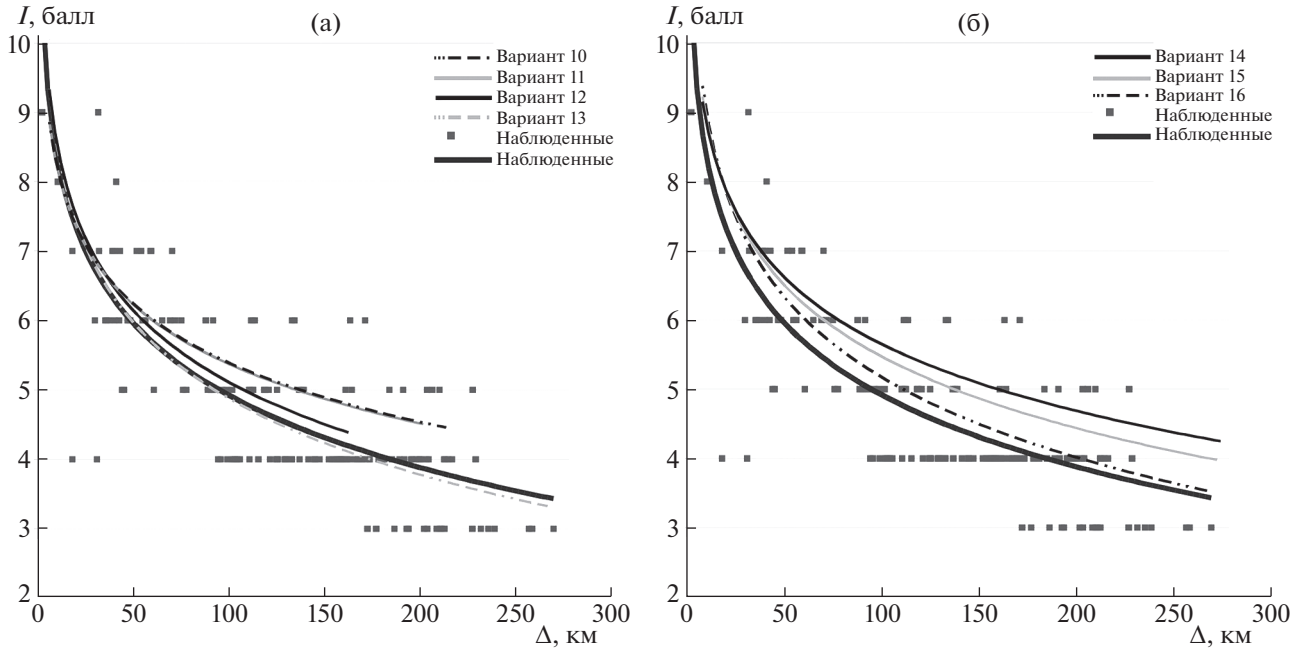


Рис. 5. Сравнение расчетной и наблюденной интенсивностей: а – варианты 10–13; б – варианты 14–16 (см. табл. 3).

риант 12), для Балканского региона при $h > 10$ км (вариант 13), откалиброванных параметров для Кавказа (варианты 10–11). На больших эпицентральных расстояниях для вариантов 10 и 11 наблюдается завышение оценок, не превышающее 0.5 балла.

Как правило, наиболее точные параметры события с небольшим запозданием дает каталог GCMT. На рис. 5б показаны результаты расчета с параметрами GCMT для трех наборов коэффициентов уравнения макросейсмического поля. На расстояниях до 60 км оценки по вариантам 14–16 довольно близкие. На больших расстояниях наилучшее согласие получено для варианта 16 при использовании уравнения для Балканского региона при $h > 10$ км.

Анализ выше приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о важности применения точных параметров события местной службой в случае их наличия. При использовании обобщенных коэффициентов поля Н.В. Шебалина (1) [41] и откалиброванных параметров поля, полученных для района-аналога на Кавказе [11, 12], сходимость расчетных и наблюденных значений интенсивностей хорошая. Следует отметить отсутствие влияния k и ориентации поля изосейст, что можно объяснить равномерной и большой плотностью населения в рассматриваемом районе.

Вывод о применимости параметров поля (1) для оперативной оценки последствий в рассматриваемом регионе подтверждается данными о наблюденном эффекте в наиболее пострадавших населенных пунктах (табл. 4), опубликованных на сайтах Геологической службы США и Global Disaster Alert and Coordination System (https://www.gdacs.org).

Таким образом, калибровка моделей системы “Экстремум” позволяет в близком к реальному масштабу времени получить оценки возможной интенсивности и ущерба в населенных пунктах и наиболее пострадавших районах. Результаты расчета представляются в виде таблиц с указанием названия населенных пунктов, их координат, численности жителей, возможной интенсивности, вероятности разных степеней повреждения застройки и средней степени повреждения для населенного пункта в целом. На рис. 6 показана визуализация последствий землетрясения 29.12.2020 г. в соответствии с вариантом № 13 (см. табл. 3). Значками разного размера показаны населенные пункты с разной численностью населения, разные оттенки серого – средняя степень повреждения застройки: 1 – $d_{ср} = 1$; 2 – $d_{ср} = 2$; 3 – $d_{ср} = 3$; 4 – $d_{ср} = 4$; 5 – $d_{ср} = 5$; 6 – нет повреждений. Для сравнения на рис. 7 приведены результаты предварительной оценки интенсивности хорватскими специалистами путем автоматической обработки данных вопросников и последующей обработки полевых наблюдений. При сравнении рис. 6 и 7 видно, что расчетные значения интенсивностей, полученные в течение 20–30 минут после определения параметров события ЕГС РАН, совпадают с наблюденными, полученными по откликам жителей на сайте Хорватской сейсмологической службы и по данным обработки полевых наблюдений.

Таблица 4. Расчетные и наблюденные интенсивности в наиболее пострадавших населенных пунктах во время землетрясения в Хорватии 29.12.2020 г.

Населенный пункт	Расчетные интенсивности *I* по разным вариантам (см. табл. 3)								Наблюденные *I*	
	№ 3	№ 4	№ 6	№ 10	№ 11	№ 12	№ 14	№ 15	*I**	*I***
Петриня	9.35	9.55	9.25	8.41	8.48	8.57	8.57	8.63	IX	VIII
Сисак	8.88	9.02	8.92	7.67	7.83	7.84	7.96	7.00	VIII	VII
Глина	8.58	8.68	8.66	7.94	8.07	8.12	6.42	8.55	VII	
Брест	9.19	9.36	9.13	8.35	8.43	8.51	8.51	8.57		VIII
Загреб	6.09	5.88	6.26	6.62	6.57	6.45	6.80	6.67	VI–VII	VI

*https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/-eventpage/us6000d3zh/dyfi/responses
**https://www.gdacs.org

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе подтверждена возможность применения параметров макросейсмического поля, полученных в процессе калибровки на Кавказе [11], в пределах его предположительного аналога – района Балканского полуострова. Оба района принадлежат к сейсмоактивному Альпийско-Гималайском поясу и, по мнению авторов, имеют сочетание тектонических структур, которое приводит к подобному затуханию значений интенсивности в точках макросейсмического поля, используемого для расчетов ожидаемых потерь.

Получена хорошая сходимость расчетных и наблюденных значений интенсивности *I* для землетрясения 22.03.2020 г. в Хорватии (рис. 8) при использовании откалиброванных параметров поля для зоны на Кавказе и параметров события по данными Итальянской (вариант 12) и Хорватской (16) сейсмологических служб.

Для землетрясения 29.12.2020 г. в Хорватии наименьшие невязки получены (рис. 9) при использовании откалиброванных параметров поля для зоны на Кавказе (варианты 2 и 6), а также при использовании коэффициентов поля, предложенных Н.В. Шебалиным для Центральной и

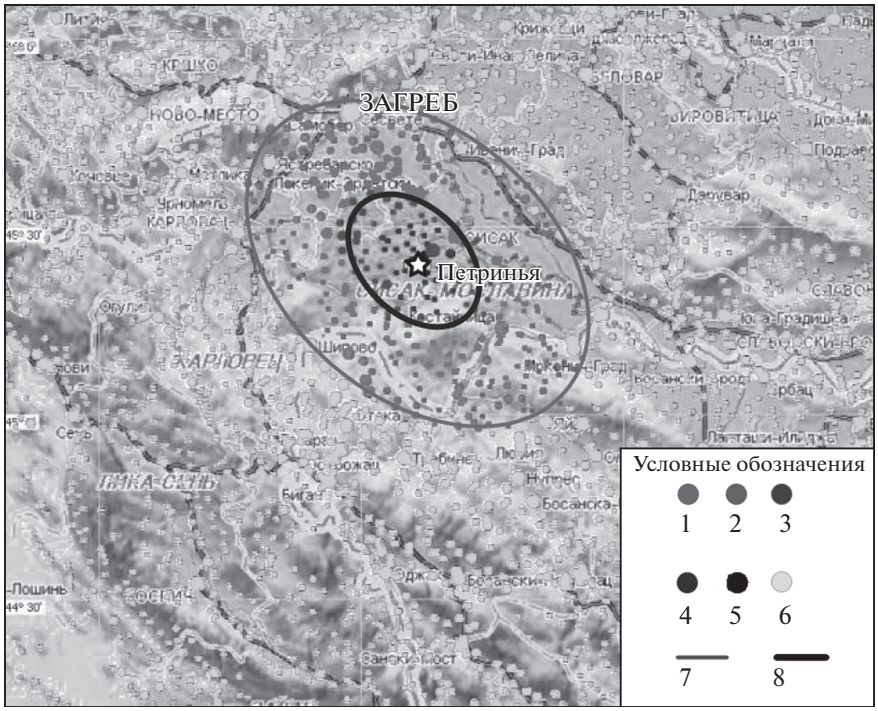


Рис. 6. Моделирование последствий землетрясения 29.12.2020 г. в оперативном режиме с помощью системы "Экстремум" (вариант 13, см. табл. 3). 1 – *d*1, 2 – *d*2, 3 – *d*3,4 – *d*4, 5 – *d*5, 6 – нет повреждений, 7 – граница зоны слабых повреждений (*d*1), 8 – граница зоны сильных повреждений (*d*3).

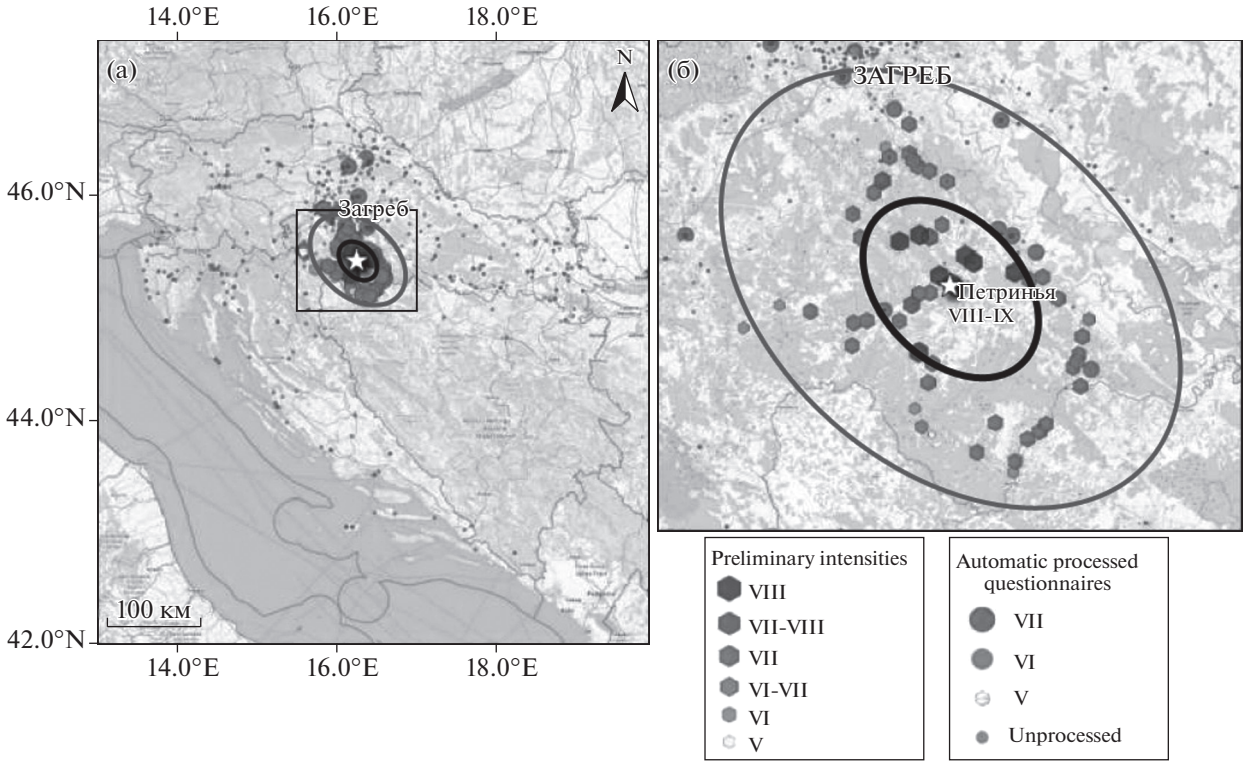


Рис. 7. а – Предварительная карта интенсивностей землетрясения 29.12.2020 г.: кружки – автоматическая обработка данных вопросников, шестиугольники – обработка полевых наблюдений; б – район Петриньи, прямоугольник на (а) по [36].

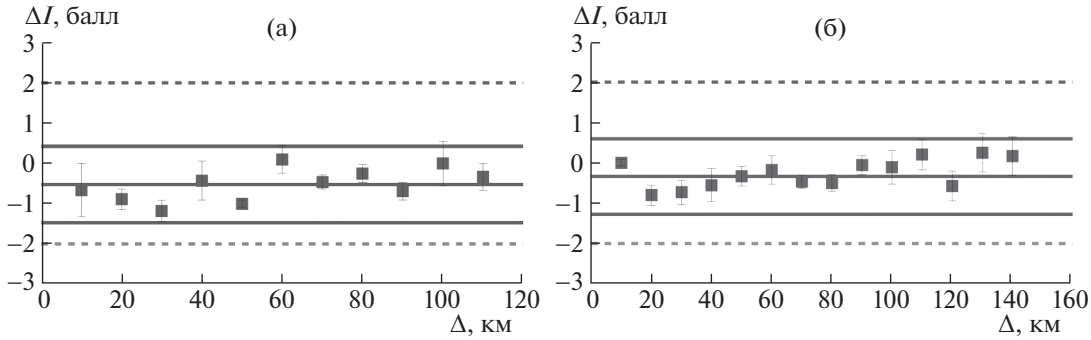


Рис. 8. Сравнение наблюденных и расчетных ΔIср для землетрясения 22.03.2020 г.: а – вариант 12, б – вариант 16. Невязки расчетных и наблюденных значений интенсивности *Ii*; медианные значения показаны серыми точками.

Юго-Восточной Европы и для Балканского региона с $h > 10$ км (варианты 12 и 13).

В ранее выполненном исследовании [12], касающемся землетрясений в Албании, было подтверждено выделение в Балканском регионе двух зон с одинаковыми квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля, границы которых были получены в работах Н.В. Шебалина 70-х годов прошлого века (рис. 10).

Показано, что параметры поля в этих зонах пригодны для дальнейшего использования в ИС "Экстремум" для оценки ожидаемых потерь применительно к Хорватии. Зона 1 (см. рис. 10) описывает структуры прибрежных Динарид, включая прибрежную часть Хорватии, Черногории и Албании. Зона 2 (см. рис. 10) включает континентальную часть, охватывающую значительную часть территорий Хорватии, Боснии и Герцеговины и Сербии. Эти территории густо заселены, что находит отражение в распределении элементов макросейсмического поля по предварительным сообщениям с мест ощутимости землетрясений –

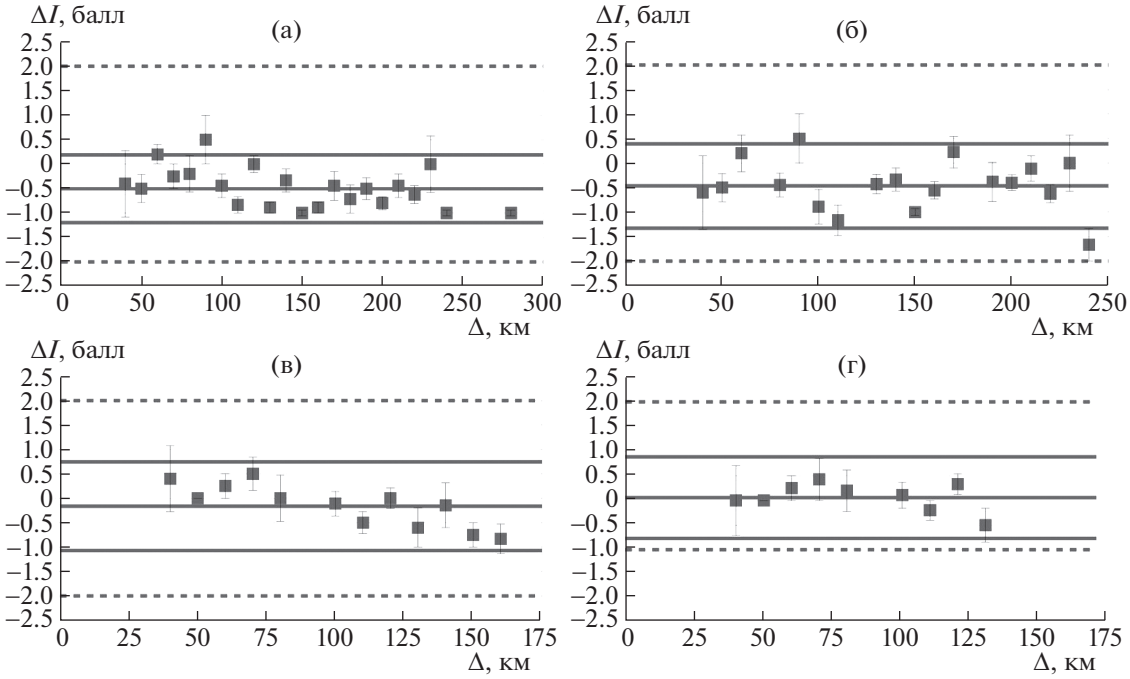


Рис. 9. Сравнение наблюденных и расчетных ΔIср для землетрясения 29.12.2020 г.: а – вариант 2, б – вариант 6, в – вариант 12, г – вариант 13. Невязки расчетных и наблюденных значений интенсивности *Ii*; медианные значения показаны серыми точками.

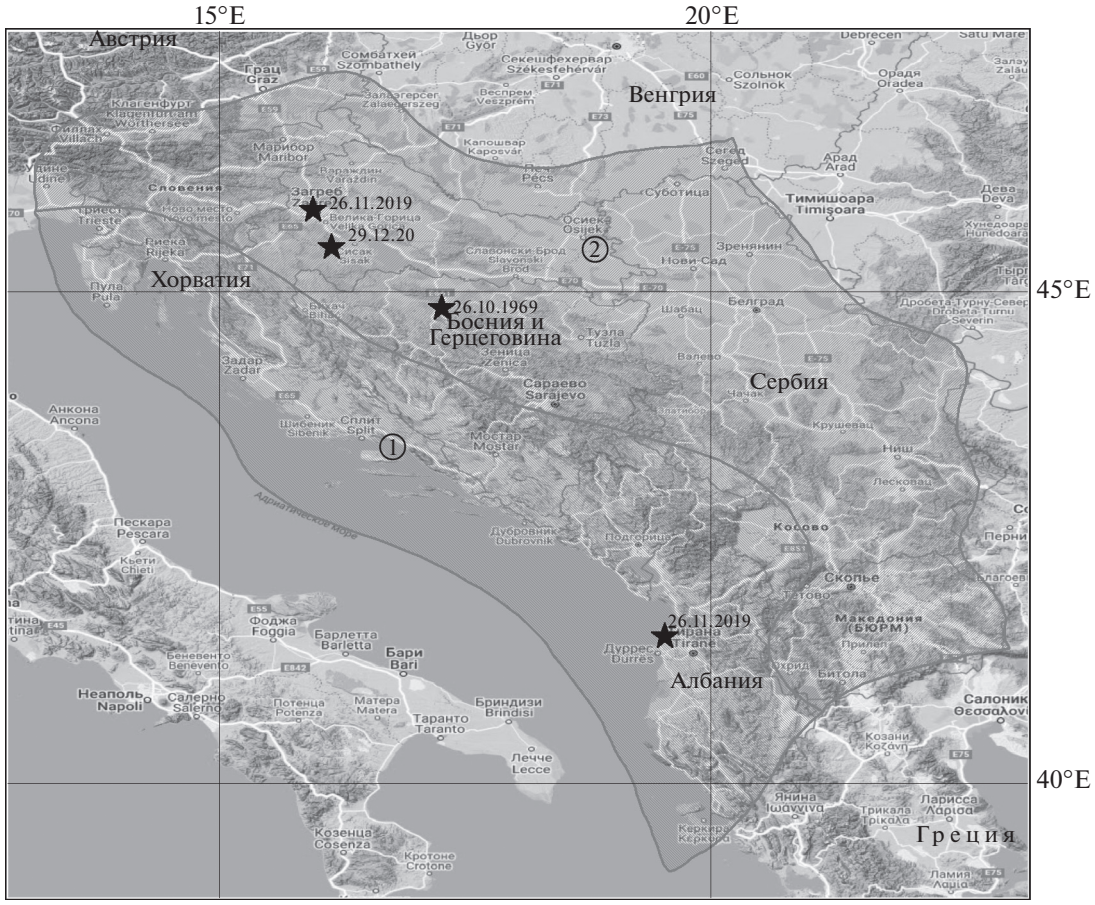


Рис. 10. Зоны на территории Балканского региона с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля для моделирования последствий в режиме времени близком к реальному по [12, 40].

оно, как правило, имеет изометричную форму. Этот факт делает неактуальным учет коэффициента вытянутости изосейст k, т.е. малозначимым в задаче калибровки для этой области. Это можно видеть по результатам, представленным на рис. 2–5.

Таким образом, установлено различие в наборе значимых параметров, характеризующих макросейсмическое поле кроме коэффициентов уравнения в прибрежных и континентальных районах: в условиях Албании учет коэффициента вытянутости изосейст k был признан значимым, а в континентальной области значимость его снизилась.

Исследования авторов в Хорватии показывают, что в ближней зоне ($\Delta < 100$ км) уравнения дают близкий результат, т.е. наблюдается хорошая сходимость расчетных и наблюденных данных по интенсивности сотрясений в баллах. На больших расстояниях ($\Delta \geq 100$ км) результаты значимо расходятся (см. рис. 2–5).

При определении устойчивых параметров поля для землетрясений, находящихся в зоне 2 (см. рис. 10), также как в [12], проявилось значительное влияние глубины очага h.

Особое значение при определении устойчивых параметров поля для землетрясений, находящихся в обеих зонах и имеющих магнитуды $M \leq 5.5$, имеют учет типа магнитуды, определенной в оперативном режиме в том или ином сейсмологическом центре и пересчет в значение магнитуды по поверхностной волне, для которой построено уравнение затухания макросейсмического поля.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Показана возможность успешного моделирования макросейсмического поля для районов-аналогов, выделенных на основе общих сейсмотектонических признаков. При успешной реализации такой возможности близкими становятся коэффициенты закона затухания (1) и отношение большой и малой осей эллиптических изосейст высших баллов, а также ориентация макросейсмического поля, заданная азимутом оси вытянутости изосейст.

2. На примере районов-аналогов, выделенных на Кавказе и Балканском регионе, выполнено моделирование и оценка точности вычисления ожидаемой сейсмической интенсивности I с использованием ИС “Экстремум”. Показано, что в случае использования параметров модели макросейсмического поля, откалиброванной по данным о хорошо изученных событиях на Кавказе, были получены приемлемые для оперативных служб оценки параметров макросейсмического поля для выделенных районов-аналогов Балканского региона. Величина погрешности при верификации макросейсмической модели в Балканском регионе не превышает 0.3 балла.

3. Подтверждена целесообразность поиска зон-аналогов для районов с редкими сейсмическими событиями и необходимость итераций, уточняющих параметры калибровки при возникновении нового сильного и разрушительного сейсмического события хотя бы в одном из районов-аналогов.

4. Описание всех обследованных событий должно попадать в специальную базу данных [4, 9], содержащую не только карты изосейст, но и параметры наблюденного эффекта в виде списка населенных пунктов отдельных районов, точек с координатами и баллами.

5. В ходе очередной калибровочной итерации возможны как дробление, так и укрупнение аналогичных районов. Минимальные размеры района ограничены точностью определения координат эпицентра землетрясения, максимальные – допустимой величиной погрешности оценки интенсивностей.

6. Для успешного проведения дальнейших работ по калибровке моделей макросейсмического поля ИС “Экстремум” необходимо создание и своевременное пополнение базы знаний о последствиях землетрясений. Представляется важным международное сотрудничество в области обработки “больших данных” (Big Data) и создание распределенной базы знаний о физических и социально-экономических последствиях прошлых сильных землетрясений в рамках проектов ООН/КОДАТА с указанием границ зон аналогов. Примером такого сотрудничества могут служить исследования Н.В. Шебалина в Балканском регионе, результаты которых актуальны и в настоящее время.

Очевидно, что продолжение работ по калибровке макросейсмического поля, а также по установлению зон-аналогов со схожими сейсмотектоническими условиями будет способствовать формализации и ускорению процесса использования макросейсмической информации в службах МЧС для эффективного расчета возможных потерь от сильных землетрясений и скорейшего принятия решения о проведении поисково-спасательных и других неотложных работ.

Авторы благодарят проф. Снежану Маркусич за предоставление инструментальных данных о параметрах очага землетрясения 22 марта 2020 г. и обсуждение результатов исследования. Также авторы выражают признательность коллективу Центра исследований экстремальных ситуаций за их вклад в развитие системы “Экстремум” и коллегам из ФИЦ ЕГС РАН за плодотворное сотрудничество.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР

№ г.р. АААА-А19-119021190077-6, государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01304-20 и проекта МГТУ им. Баумана № 075-11-2019-087 от 18.12.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Киреев И.А, Вандышева Н.В.* Унифицированный каталог землетрясений Северной Евразии с древнейших времен до 1995 г. URL: http: //www.scgis.ru System of data bases. JIPE RAS, 1996.
2. *Лутиков А.И., Габсатарова И.П.* Соотношение между моментной магнитудой MW и магнитудой по поверхностным волнам MS для Кавказского региона и сопредельных территорий // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 1. С. 29–36.
3. *Петрова Н.В., Михайлова Р.С.* Проблемы единой магнитудной классификации землетрясений Кавказ-Копетдагской сейсмоактивной зоны // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Десятой междунар. сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015. С. 257–262.
4. *Петрова Н.В., Диденко В.И., Морозова А.Д.* Разработка базы данных “Сильные и ощутимые землетрясения России и сопредельных стран” // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Седьмой научно-техн. конф. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 191–196. URL: http://www.emsd.ru/conf2019lib/mlib2.html
5. *Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П.* Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 5–25. https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-1
6. *Радзиминович Я.Б., Гилева Н.А., Середкина А.И., Мельникова В.И.* Джиргинское землетрясение 27 апреля 2014 г. с $K_P = 13.3$, $Mw = 4.9$, $I_0 = 7$ (Северное Прибайкалье) // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 23 (2014). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 307–316. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.31.
7. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Ред. В.И. Уломов, Н.С. URL: http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf.
8. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
9. *Фролова Н.И., Угаров А.Н.* База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надежности оперативных оценок потерь // Геоэкология. 2018. № 6. С. 1–18.
10. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Использование макросейсмических данных для повышения надежности оперативных оценок потерь на примере землетрясений стран СНГ. Матер. XIII Междунар. сейсмологической школы Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 292–297.
11. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Петрова Н.В., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Влияние особенностей затухания сейсмической интенсивности на надежность оперативных оценок потерь от землетрясений // Геоэкология. 2019. № 5. С. 23–37.
12. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на примере землетрясений в Албании // Геоэкология. 2020. № 5. С. 62–77. https://doi.org/10.31857/S0869780920050033
13. *Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.
14. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–121.
15. *Шебалин Н.В.* Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля // Новый Каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен до 1975 г.). М.: Наука, 1977. С. 20–30.
16. *Шулаков Д.Ю.* Уточнение сейсмической опасности для района г. Перми // Горное эхо. 2020. № 3 (80). С. 92–98. https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.18.
17. *Basham P., Giardini D.* Technical guidelines for global seismic hazard assessment // Ann. Geofis. 1993. V. XXXVI. № 3–4. P. 15–20.
18. *Bindi D., Spallarossa D., Picozzi M., Scafidi D., Cotton F.* Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with GroundMotion Prediction Equations: Part I. Local, energy, and moment magnitude calibration and stress-drop variability in central Italy // Bull. Seism. Soc. Am., 2018. № 108 (3A). P. 1427–1441.
19. *Bindi D., Zaccarelli R., Strollo A., Giacomo D.* Harmonized local magnitude attenuation function for Europe usingthe European Integrated Data Archive (EIDA) // Geophys. J. Int., 2019. № 218. P. 519–533.
20. *Bindi D., Picozzi M., Spallarossa D., Cotton F., Kotha S.R.* Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with Ground Motion Prediction Equations: Part II. Analysis of the between event distribution in central Italy // Bull. Seism. Soc. Am., 2019. № 109 (1). https://doi.org/10.1785/0120180239
21. *Bormann P.* (ed). IASPEI New manual of seismological observatory practice (NMSOP). Geo Forchungs Zentrum, Potsdam. Bormann P., Baumbach M., Bock G., Grosser H., Choy G., Boatwright J. Chapter 3. Seismic Sources and Source Parameters. 2012. 94 p.
22. *Deichmann N.* Theoretical basis for the observed break in ML/Mw scaling between small and large earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am., 2017. № 107 (2). P. 505–520.

23. *Deichmann N.* Why does ML scale 1:1 with 0.5log Es? // Seimol. Res. Lett., 89, 2018, 2249–2255. https://doi.org/10.1785/0220180121
24. Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region. UNDP Project Executed by UNESCO in Association with UNDRO (RER/79/014). Working Group A. SEISMOLOGY, SEISMOTECTONICS, SEISMIC HAZARD AND EARTJQUAKE PREDICTION. Final Report. Athens, December 1982. 157 p.
25. *Grunthal G. & Wahlstrom R.* The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium // J. Seismol., 2012. № 16. P. 535–570.
26. *Herak M., Herak D., Stipcevic J.* Seismology in Croatia, 2015–2018 // Geofizika. 2019. V. 36. № 2. P. 217–224.
27. *Herak M.* Conversion between the local magnitude (ML) and the moment magnitude (Mw) for earthquakes in the Croatian Earthquake Catalogue // Geofizika. 2020. V. 37. № 2. P. 197–211. https://doi.org/10.15233/gfz.2020.37.10
28. *Ivančić I., Herak D., Markušić S., Sović I., Herak M.* Seismology in Croatia in the period 1997–2001 // Geofizika. 2001–2002. V. 18–19. № 2. P. 17–29.
29. *Ivančić I., Herak D., Sović I., Herak M.* Seismology in Croatia in the period 2002–2005 // Geofizika. 2006. V. 23. № 2. P. 87–103.
30. *Ivančić I., Herak D., Herak M., Allegretti I., et al.* Seismicity of Croatia in the period 2006–2015 // Geofizika, 2018. V. 35. № 1. P. 69–98. https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2
31. *Kanamori H.* Magnitude Scale and Quantification of Earthquakes // Tectonophysics. 1983. № 93. P. 185–199. https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1
32. *Kanamori H., Hauksson E., Hutton L.K., Jones L.M.* Determination of earthquake energy release and ML using TERRAscope // Bull. seism. Soc. Am., 1993. № 83. P. 330–346.
33. *Markušić S., Herak D., Ivančić I., Sović I., et al.* Seismicity of Croatia in the period 1993–1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996 // Geofizika. 1998. V. 15. UDC 550.342.2.
34. *Markušić S. and Herak M.* Seismic zoning of Croatia // Natural Hazards. 1999. № 18. P. 269–285.
35. *Markušić S., Stanko D., Korbar T., Belić N., et al.* The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020 // Geosciences. 2020. № 10. P. 252. https://doi.org/10.3390/geosciences10070252
36. *Markušić S., Stanko D., Penava D., Ivančić I., et al.* Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 // Preliminary Multidisciplinary Research. Remote Sens. 2021. № 13, 1095. https://doi.org/10.3390/rs13061095
37. *Papazachos C. and Papaioannou Ch.* The macroseismic field of the Balkan area // Journal of Seismology. 1997. 1: 181–201.
38. *Papazachos C. and Papaioannou Ch.* Further information on the macroseismic field in the Balkan area // Journal of Seismology. 1998. 2: 363–375.
39. *Richter C.* An instrumental earthquake magnitude scale // Bull. Seism. Soc. Am., 1935. № 25. P. 1–32.
40. *Shebalin N.V., Karnik V., Had'ievski D.* (eds) Catalogueof earthquakes. Part I, 1901–1970, Part II, prior to 1901, Part III, Atlas of isoseismal maps. UNDP/UNESCOSurvey of the seismicity of the Balkan region, Skopje. 1974.
41. *Shebalin N.V., Leydecker G., Mokrushina N.G., Tatevossian R.E., Erteleva O.O., Vassiliev V.Yu.* Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 BC – 1990 AD. Final Report to Contract ETNU – CT93-0087

CALIBRATION OF SEISMIC INTENSITY ATTENUATION MODEL FOR THE BALKAN REGION (THE 2020 EARTHQUAKES IN CROATIA)

N. I. Frolova[a,#], I. P. Gabsatarova[b,##], S. P. Suchshev[c,###], A. N. Ugarov[c], and N. S. Malaeva[a]

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

[b] *Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Lenina pr., 189, Obninsk, Kaluga region, 249035 Russia*

[c] *Moscow State Technical University named after Bauman, 2-ya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia*

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

[##] *E-mail: ira@gsras.ru*

[###] *E-mail: Sersan150@mail.ru*

The paper describes the results of studies aimed at calibration of the parameters of the macroseismic field model in one of the zones in the Balkans based on the data of the 2020 earthquakes in Croatia. The zone is located within the continental region of Croatia, on the border of the Dinarids and the southern part of the Pannonian Basin, which are a part of the Alpine-Himalayan seismic belt. The calibrated parameters of the macroseismic field model obtained for another region of this belt, located in the Caucasus, which manifest the similar features of tectonic development, were used for comparison. In order to increase the reliability of near real time earthquake loss estimations, the paper analyzes the alert messages from several seismological centers, focal mechanisms for taking into account the direction of radiation and the choice of a seismogenic fault in the Earth's crust. Simulated intensities obtained with "Extremum" System application were compared with reported ones. The obtained calibration results supplemented the database used for earthquake

consequences simulation in emergency mode, and will be used for near real time loss estimations with the "Extremum" system application in the case of destructive earthquakes in the Balkan Peninsula region.

Keywords: *near real time earthquake loss estimates*, *damaging earthquake*, *macroseismic field model calibration*, *the Alpine-Himalayan seismic active belt*, *region analogs*, *Information System "Extremum"*

REFERENCES

1. Kondorskaya, N.V., Gorbunova, I.V., Kireev, I.A, Vandysheva, N.V. *Unifitsirovannyi katalog zemletryasenii Severnoi Evrazii s drevneishikh vremen do 1995 g.* [Special earthquake catalogue of Northern Eurasia from ancient times through 1995]. N.V. Kondorskaya, V.I. Ulomov, Eds. URL: http://www.scgis.ru System of data bases. JIPE RAS, 1996. (in Russian)
2. Lutikov, A.I., Gabsatarova, I.P. *Sootnoshenie mezhdu momentnoi magnitudoi MW i magnitudoi po poverkhnostnym volnam MS dlya Kavkazskogo regiona i sopredel'nykh territorii* [Relationship between moment magnitude MW and surface wave magnitude MS for the Caucasus region and adjacent territories]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 29–36. (in Russian)
3. Petrova, N.V., Mikhailova, R.S. *Problemy edinoi magnitudnoi klassifikatsii zemletryasenii Kavkaz-Kopetdagskoi seismoaktivnoi zony* [Problems of a unified magnitude classification of earthquakes in the Caucasus-Kopetdag seismic zone]. In: *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Proc. Tenth Int. Seismological School. A.A. Malovichko, Ed.-in-Chief. Obninsk: FITs EGS RAS, 2015, pp. 257–262. (in Russian)
4. Petrova, N.V., Didenko, V.I., Morozova, A.D. *Razrabotka bazy dannykh "Sil'nye i oshchutimye zemletryaseniya Rossii i sopredel'nykh stran"* [Development of the database "Strong and moderate earthquakes occurred in Russia and adjacent countries"]. In: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoring Dal'nego Vostoka Rossii* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East]. Proc. the 7th scientific and technical conference. D.V. Chebrov, Ed.-in-chief. Obninsk, GS RAS, 2019. pp. 191–196. http://www.emsd.ru/conf2019lib/mlib2.html (in Russian)
5. Petrova, N.V., Dyagilev, R.A., Gabsatarova, I.P. *Osobennosti zatukhaniya seismicheskogo effekta zemletryasenii Russkoi platformy i Urala* [Features of attenuation of the seismic effect of earthquakes in the Russian platform and the Urals]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2020, vol. 47, no. 4, pp. 5–25. https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-1 (in Russian)
6. Radziminovich, Ya.B., Gileva, N.A., Seredkina, A.I., Mel'nikova, V.I. Dzhirga earthquake on April 27, 2014 with $K_p = 13.3$, $Mw = 4.9$, $I_0 = 7$ (Northern Pribaikalia). In: *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii* [Earthquakes of Northern Eurasia]. 2014, issue 23. Obninsk: FRC EGS RAS, 2020, pp. 307–316. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2020.23.31. (in Russian)
7. *Spetsializirovannyi katalog zemletryasenii dlya zadach obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii* [Specialized catalog of earthquakes for general seismic zoning of the Russian Federation territory]. V.I. Ulomov, N.S. Medvedeva, Eds. URL: http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf (in Russian)
8. Ulomov, V.I., Shumilina, L.S. *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh* [Set of maps OSR-97-A, B, C of review seismic zoning of the Russian Federation territory – OSR-97. Scale 1: 8 000 000. Explanatory note and list of cities and settlements located in earthquake prone areas]. Moscow, OIFZ, 1999, 57 p. (in Russian)
9. Frolova, N.I., Ugarov, A.N. *Baza znanii o sil'nykh zemletryaseniyakh kak instrument povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter'* [Knowledge base about past earthquakes as a tool to increase the reliability of near real time loss estimation]. *Geoekologiya,* 2018, no. 6, pp. 1–18. (in Russian)
10. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. *Ispol'zovanie makroseismicheskikh dannykh dlya povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere zemletryasenii stran SNG* [The use of macroseismic data to improve the reliability of operational estimates of losses by the example of earthquakes in CIS countries]. Proc. XIII Int. seismological school "Modern methods of processing and interpretation of seismological data". A.A. Malovichko, Ed.-in-Chief. Obninsk, EGS RAN, 2018, pp. 292–297. (in Russian)
11. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Petrova, N.V., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. *Vliyanie osobennostei zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na nadezhnost' operativnykh otsenok poter' ot zemletryasenii* [Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode]. *Geoekologiya,* 2019, no. 5, pp. 23–37. (in Russian)
12. Frolova, N.I., Gabsatarova, I.P., Ugarov, A.N., Malaeva, N.S. *Kalibrovka modeli zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na primere zemletryasenii v Albanii* [Seismic intensity attenuation model calibration by the example of earthquakes in Albania]. *Geoekologiya,* 2020, no. 5, pp. 62–77. https://doi.org/10.31857/S0869780920050033. (in Russian)
13. Khain, V.E. *Tektonika kontinentov i okeanov* [Tectonics of continents and oceans]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2001, 606 p.
14. Shebalin, N.V. *Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seismologicheskikh dannykh pri seismicheskom raionirovanii* [Procedures of engineering seismological data application for seismic zoning]. In: *Seismicheskoe raionirovanie SSSR* [Seismic zoning of the USSR]. Moscow, Nauka, 1968, pp. 95–121. (in Russian)
15. Shebalin, N.V. *Opornye zemletryaseniya i uravneniya makroseismicheskogo polya* [Reference earthquakes and

macroseismic field equations]. *Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii na territorii SSSR (s drevneishikh vremen do 1975 g)* [New catalogue of strong earthquakes for the USSR territory from ancient times till 1975)]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 20–30. (in Russian)

16. Shulakov, D.Yu. *Utochnenie seismicheskoi opasnosti dlya raiona g. Permi* [Verification of seismic hazard for the area of Perm]. *Gornoe ekho*, 2020, no. 3 (80), pp. 92–98. DOI: 10.7242/echo.2020.3.18. (in Russian)
17. Basham, P., Giardini, D. Technical guidelines for global seismic hazard assessment. *Ann. Geofis.*, 1993, vol. XXXVI, no 3–4, pp. 15–20.
18. Bindi, D., Spallarossa, D., Picozzi, M., Scafidi, D. & Cotton, F. Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with Ground Motion Prediction Equations: Part I. Local, energy, and moment magnitude calibration and stress-drop variability in central Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.,* 2018, no. 108 (3A), pp. 1427–1441.
19. Bindi, D., Zaccarelli, R., Strollo, A., Giacomo, D. Harmonized local magnitude attenuation function for Europe using the European Integrated Data Archive (EIDA). *Geophys. J. Int.,* 2019, no. 218, pp. 519–533.
20. Bindi, D., Picozzi, M., Spallarossa, D., Cotton, F. & Kotha, S.R. Impact of magnitude selection on aleatory variability associated with Ground Motion Prediction Equations: Part II. Analysis of the between event distribution in central Italy. *Bull. seism. Soc. Am.*, 2019, no. 109 (1). DOI:10.1785/0120180239
21. Bormann, P. (ed). IASPEI New manual of seismological observatory practice (NMSOP). Geo Forchungs Zentrum, Potsdam. Bormann, P., Baumbach, M., Bock, G., Grosser, H., Choy, G., Boatwright, J. Chapter 3. Seismic Sources and Source Parameters. 2012, 94 p.
22. Deichmann, N. Theoretical basis for the observed break in ML/Mw scaling between small and large earthquakes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 2017, no. 107 (2), pp. 505–520.
23. Deichmann, N. Why does ML scale 1:1 with 0.5log Es? *Seimol. Res. Lett.,* 2018, no. 89, pp. 2249–2255. https://doi.org/10.1785/0220180121
24. Earthquake risk reduction in the Balkan region. UNDP project executed by UNESCO in association with UNDRO (RER/79/014). Working Group A. Seismology, seismotectonics, seismic hazard and earthquake prediction. Final Report. Athens, December 1982, 157 p.
25. Grunthal, G. & Wahlstrom, R. The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *J. Seismol.,* 2012, no. 16, pp. 535–570.
26. Herak, M., Herak, D., Stipcevic, J. Seismology in Croatia, 2015–2018. *Geofizika*, 2019, vol. 36, no. 2, pp. 217–224.
27. Herak, M. Conversion between the local magnitude (ML) and the moment magnitude (Mw) for earthquakes in the Croatian Earthquake Catalogue. *Geofizika*, 2020, vol. 37, no. 2, pp. 197–211. https://doi.org/10.15233/gfz.2020.37.10.
28. Ivancić, I., Herak, D., Markušić S., Sović I., Herak, M. Seismology in Croatia in the period 1997–2001. *Geofizika*, 2001–2002, vol. 18–19, no. 2, pp. 17–29.
29. Ivancić, I., Herak, D., Sović I., Herak, M. Seismology in Croatia in the period 2002–2005. *Geofizika*, 2006, vol. 23, no. 2, pp. 87–103.
30. Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., et al. Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. *Geofizika,* 2018, vol. 35, no. 1, pp. 69–98. https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2.
31. Kanamori, H. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics,* 1983, no. 93, pp. 185–199. http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1
32. Kanamori, H., Hauksson, E., Hutton, L.K. & Jones, L.M. Determination of earthquake energy release and ML using TERRAscope. *Bull. seism. Soc. Am.*, 1993, no. 83, pp. 330–346.
33. Markušić, S., Herak, D., Ivancić, I., Sović, I., et al. Seismicity of Croatia in the period 1993-1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996. *Geofizika*, 1998, vol. 15, UDC 550.342.2.
34. Markušić, S. and Herak, M. Seismic zoning of Croatia. *Natural Hazards*, 1999, no. 18, pp. 269–285.
35. Markušić, S., Stanko, D., Korbar, T., Belić N., et al. The Zagreb (Croatia) M5.5 earthquake on 22 March 2020. *Geosciences*, 2020, no. 10, pp. 252. https://doi.org/10.3390/geosciences10070252.
36. Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivancić, I., et al. Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020. *Preliminary Multidisciplinary Research. Remote Sens.*, 2021, no. 13, p. 1095. https://doi.org/10.3390/rs13061095
37. Papazachos, C. & Papaioannou, Ch. The macroseismic field of the Balkan area. *Journal of Seismology*, 1997, no. 1, pp. 181–201.
38. Papazachos, C. & Papaioannou, Ch. Further information on the macroseismic field in the Balkan area. *Journal of Seismology,* 1998, no. 2, pp. 363–375.
39. Richter, C. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1935, no. 25, pp. 1–32.
40. Shebalin, N.V., Karnik, V., Had`ievski, D. (eds) Catalogue of earthquakes. Part I, 1901–1970, Part II, prior to 1901, Part III, Atlas of isoseismal maps. UNDP/UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region, Skopje. 1974.
41. Shebalin, N.V., Leydecker, G., Mokrushina, N.G., Tatevossian, R.E., Erteleva, O.O., Vassiliev, V.Yu. Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 BC – 1990 AD. Final Report to Contract ETNU –CT93-0087. 1998.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 22–33

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.348.098.64

СЕЙСМИЧНОСТЬ РОССИИ В 2020 ГОДУ

© 2021 г. А. А. Маловичко[1,*], М. В. Коломиец[1,], А. И. Рузайкин[2,***]**

[1] Федеральный исследовательский центр Единая геофизическая служба РАН, ул. Ленина, 189, Обнинск, Калужская область, 249035 Россия

[2] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская, 10, Москва, 123995 Россия

**E-mail: amal@gsras.ru*

***E-mail: kolmar@gsras.ru*

****E–mail: a.ruzaykin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.
После доработки 16.03.2021 г.
Принята к публикации 10.04.2021 г.

В работе представлены результаты мониторинга сейсмичности для основных сейсмоактивных регионов России: Кавказа, Восточно-Европейской платформы, Арктики, Алтая и Саян, Прибайкалья и Забайкалья; Приамурья и Приморья; Сахалина, Курило-Охотского региона, Якутии, Северо-Востока России и Чукотки, Камчатки и Командорских островов в 2020 г. Для каждого региона приведены каталоги наиболее значимых землетрясений с параметрами гипоцентров и магнитуд, полученными по данным обработки инструментальных наблюдений. Проанализировано проявление макросейсмического эффекта от большинства ощутимых землетрясений (с $I \geq 2.5$ баллов по шкале ШСИ-2017), произошедших на территории России.

Ключевые слова: *сейсмические станции*, *сейсмологический мониторинг*, *магнитуда*, *макросейсмический эффект*

DOI: 10.31857/S0869780921040068

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. в Федеральном исследовательском центре “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (ФИЦ ЕГС РАН) были продолжены работы по сейсмическому мониторингу территории России [2, 6, 8]. В получении сейсмических данных и их обработке участвовали более 358 сейсмостанций и 11 региональных информационно-обрабатывающих центров, расположенных во всех сейсмоактивных регионах России.

В проведении регионального мониторинга различных регионов Российской Федерации принимали также участие сейсмические станции Российской академии наук (Горный институт Уральского отделения (УрО), г. Пермь; Институт экологических проблем Севера УрО, г. Архангельск; Институт геологии Коми НЦ УрО, г. Сыктывкар; Институт динамики геосфер, г. Москва). Мониторинг сейсмических процессов на территории Воронежского кристаллического массива и на территории Красноярского края осуществлялся с использованием сейсмических станций, принадлежащих Воронежскому государственному университету и Краевому государственному бюджетному учреждению “Центр реализации мероприятий по природопользованию и охране окружающей среды Красноярского края”.

СТРУКТУРА НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ

В 2020 г. структура наблюдательной сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН в основном сохранилась. Были введены в эксплуатацию новые станции – “Катав-Ивановск” в Челябинской области, “Монахово” в Бурятии. Кроме того, совместно с МЧС РФ в целях обеспечения поддержки принятия решений Аварийно-спасательного центра мониторинга и прогноза (АСЦМП) ЧС ГУ МЧС России по Сахалинской области, как часть системы комплексной безопасности и защиты от рисков чрезвычайных ситуаций, были организованы пункт “Китовый” на о. Итуруп и станция “Южно-Курильск” на о. Кунашир. Дополнительно предусмотрено предоставление оперативной информации для сотрудников АСЦМП о произошедших сейсмических событиях, в том числе с использованием автоматизированного сервиса оценки инструментальной интенсивности сотрясений по записи сильных движений в режиме квазиреального времени.

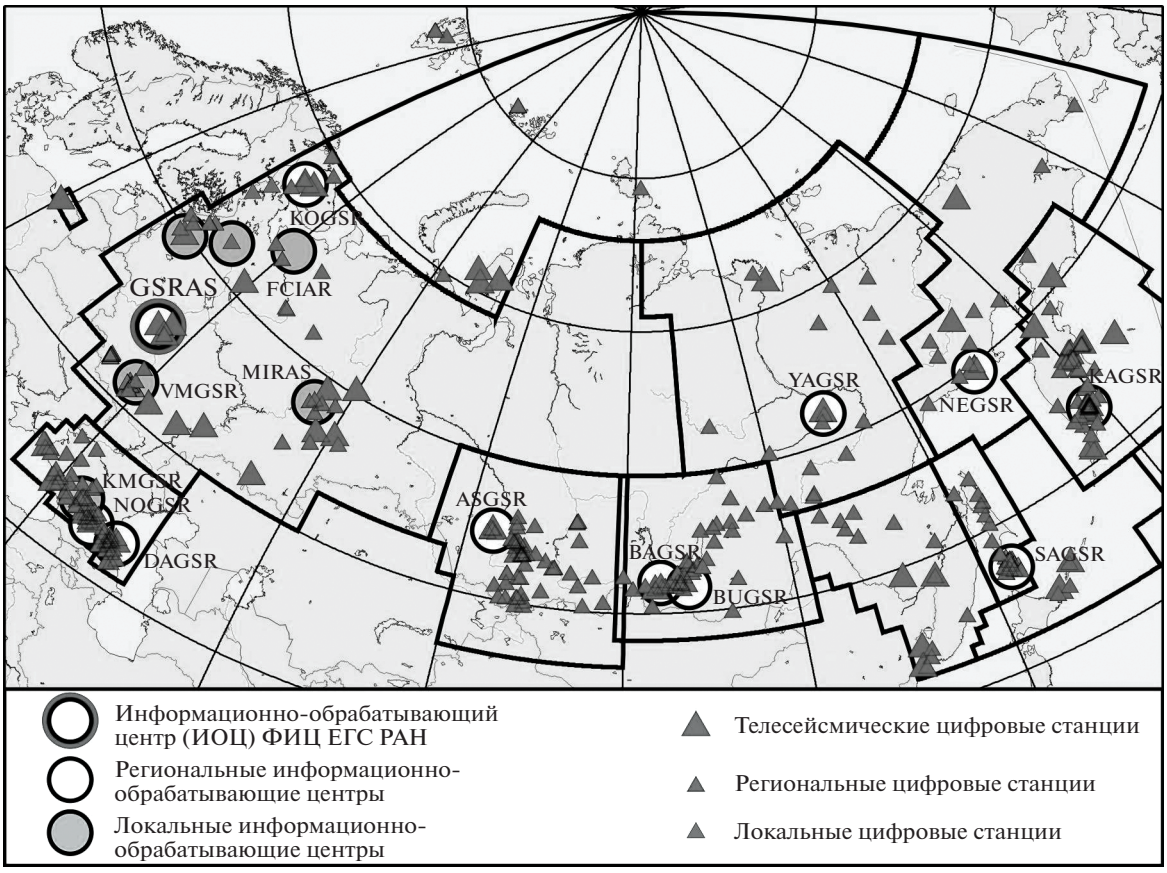


Рис. 1. Карта расположения на территории Российской Федерации сейсмических станций, данные которых были использованы при определении параметров землетрясений.

На рис. 1 приведена карта расположения на территории Российской Федерации сейсмических станций, данные которых были использованы при определении параметров землетрясений. Жирные черные линии показывают контуры 11 сейсмоактивных регионов России, согласно принятой в ФИЦ ЕГС РАН регионализации [3].

Обработка сейсмологических данных в ФИЦ ЕГС РАН осуществляется в двух режимах – в срочном (близком к реальному времени) и текущем.

Срочный режим обработки осуществляют Службы срочных донесений (ССД), функционирующие в г. Обнинск, а также в пяти филиалах – Камчатском (г. Петропавловск-Камчатский), Сахалинском (г. Южно-Сахалинск), Байкальском (г. Иркутск), Алтае-Саянском (г. Новосибирск) и Северо-Осетинском (г. Владикавказ). ССД в Обнинске осуществляет непрерывный мониторинг сейсмичности территории России и Земного шара, а ССД филиалов – региональный мониторинг. Камчатский и Сахалинский филиалы ФИЦ ЕГС РАН также обеспечивают функционирование сейсмической подсистемы в рамках Федеральной системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России.

В ССД в течение 10–20 минут осуществляется обработка всех поступающих в режиме реального времени сейсмологических данных и формируются срочные донесения для оповещения центральных и местных органов исполнительной власти, а также структур МЧС о произошедших землетрясениях и их возможных последствиях. В случае сильных и разрушительных землетрясений эта информация обеспечивает принятие экстренных мер по оказанию помощи пострадавшим районам, спасению жизни людей и ликвидации последствий стихийного бедствия.

Уточнения гипоцентров проводятся с привлечением данных с опорных и региональных станций, в станционные сводки при наличии включаются макросейсмические данные. Для анализа большого количества сравнительно слабых землетрясений, а также афтершоков, возникающих после сильных землетрясений, привлекаются данные зарубежных станций. Принципы работы ССД в Обнинске подробно описаны в работах [7, 9].

Текущий режим обработки, при котором используются данные более 950 сейсмических станций как российских, так и мировой сети, обеспе-

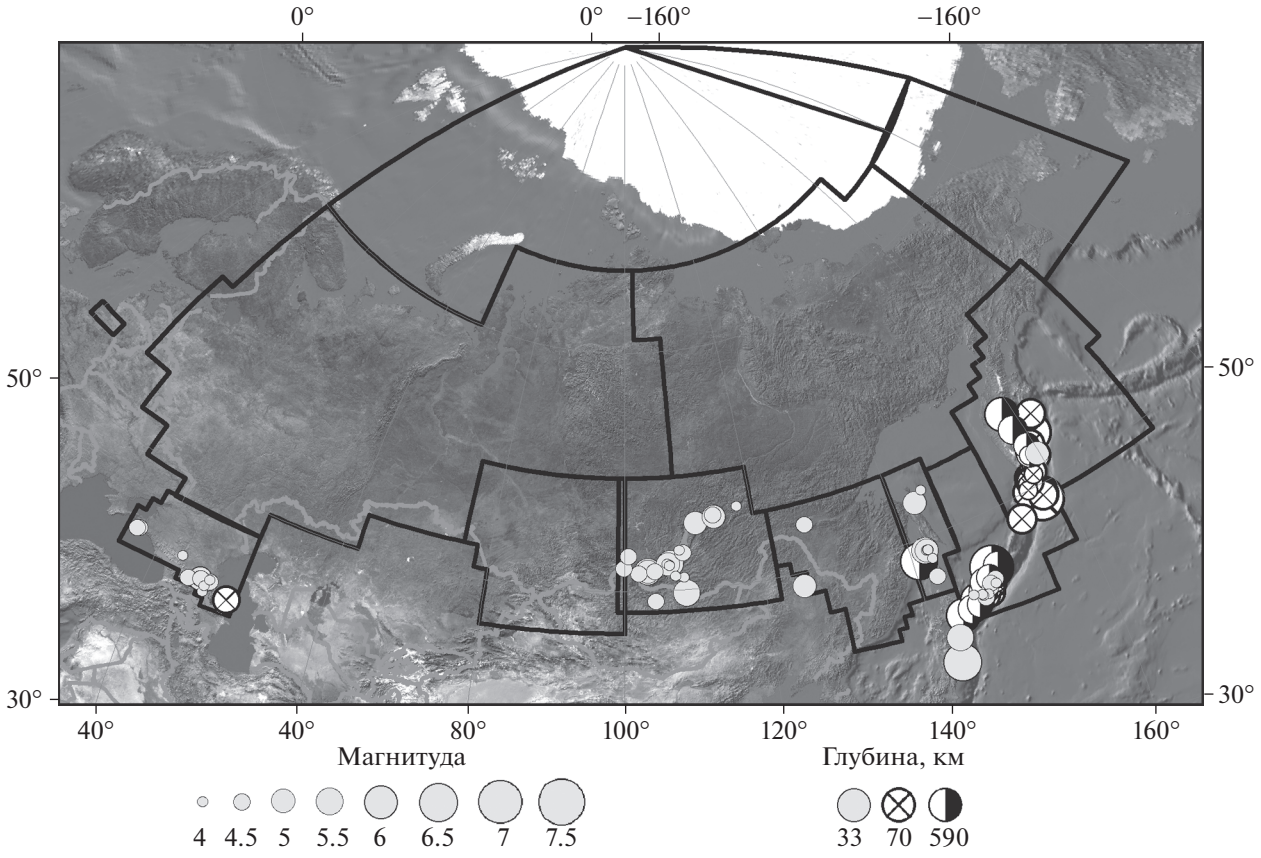


Рис. 2. Карта расположения эпицентров землетрясений, ощутимых на территории Российской Федерации в 2020 г.

чивает выпуск сейсмологических каталогов и бюллетеней ФИЦ ЕГС РАН.

С 2015 г. в Центральном отделении ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск) успешно функционирует автоматизированная система сбора и анализа макросейсмических данных об ощутимых землетрясениях на территории России в режиме реального времени с использованием сети Интернет [5], которая позволяет повысить оперативность получения информации об интенсивности ощутимых землетрясений и масштабах последствий при реализации сильных и катастрофических землетрясений на территории России и стран СНГ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В целом на территории России в 2020 г., по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН, при проведении сейсмического мониторинга зафиксировано 651 землетрясение (в 2019 г. – 681, в 2018 г. – 635 землетрясений) с $m_b \geq 3.1$, в том числе количество землетрясений, ощутимых на территории России – 101 (в 2019 г. – 83, в 2018 г. – 92) (рис. 2). В табл. 1 приведены данные о проявлении макросейсмического эффекта от основных ощутимых землетрясений на территории России в 2020 г. [1].

Рассмотрим результаты изучения сейсмичности на территории Российской Федерации, полученные в основных сейсмоактивных регионах России в направлении с запада на восток.

В 2020 г. в районе Крыма зафиксировано 2 землетрясения с $m_b \geq 4.1$, ощутимых не было.

На территории региона Западного Кавказа и в прилегающей акватории Черного моря в 2020 г. было зафиксировано 28 землетрясений с $m_b \geq 3.3$, из них 4 ощутимых с $m_b \geq 3.9$ (см. табл. 1). Самое сильное землетрясение с $m_b = 4.3$ произошло 12.12.2020 г. в акватории Черного моря между Анапой и Новороссийском и вызвало сотрясения интенсивностью до 4–5 баллов по шкале ШСИ-2017[1] в близлежащих населенных пунктах.

В 2020 г. на территории региона Восточного Кавказа зафиксировано 146 землетрясений с $m_b \geq 3.1$, из них 9 ощутимых *с* $m_b \geq 3.6$ (см. табл. 1). Самое сильное землетрясение региона произошло также 12.12.2020 г. на территории Чеченской Республики с $m_b = 4.7$ и вызвало интенсивность

[1] ШСИ-17 - шкала сейсмической интенсивности. См. ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартинформ, 2017. 28 с. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200146265

сотрясений в близлежащих населенных пунктах силой до 5 баллов по шкале ШСИ-2017.

На обширной, но слабосейсмичной территории Восточно-Европейской платформы, Урала и Западной Сибири не зарегистрировано ни одного землетрясения в 2020 г. с $m_b \geq 3.5$.

В Арктическом регионе на территории зоны ответственности Российской Федерации было зарегистрировано 7 землетрясений с $m_b \geq 4.3$, из них 3 землетрясения с эпицентрами, расположенными в районе севернее архипелага Северная Земля, 2 землетрясения с эпицентрами, расположенными восточнее архипелага Северная Земля, 1 с эпицентром, расположенным севернее Земли Франца-Иосифа, и еще одно с эпицентром в море Лаптевых (см. табл. 1). Поскольку эпицентры этих землетрясений располагались далеко от населенных пунктов, сведений об их ощутимости не поступало.

В районе архипелага Шпицберген вне зоны ответственности Российской Федерации были зарегистрированы 8 землетрясений с $m_b \geq 4.5$.

В южной части Сибири в пределах Горного Алтая и Саян и пограничной области России и Монголии в 2020 г. было зарегистрировано 11 землетрясений с $m_b \geq 3.8$, ощутимых не было.

На территории Прибайкалья и Забайкалья в рассматриваемый период наблюдений произошло 36 землетрясений с $m_b \geq 3.6$. Данные о 21 ощутимом событии (одно на территории Монголии) приведены в табл. 1. Самое сильное землетрясение (21.09.2020), эпицентр которого располагался на глубине 10 км в Иркутской области, имело магнитуду $m_b = 5.5$ ($MS = 5.2$) и вызвало интенсивность сотрясений в населенных пуктах Култук, Быстрая – 6–7 баллов; Слюдянка – 6 баллов; Иркутск, Урик, Маркова, Белореченский, Мамоны, Шелехов, Введенщина, Чистые Ключи, Голубые Ели, Роял Парк, Ангарск, Усолье-Сибирское, Закаменск, Карлук, Листвянка, Моты, Мегет, Оёк, Оса, Хомутово – 5 баллов; Черемхово, Байкальск, Усть-Куда, Бохан, Дзержинск, Куда, Средний, Тулун – 4–5 баллов; Молодежный Свирск, Утулик, Кяхта, Харанжино, Бозой, Братск, Грановщина, Еланцы, Зима, Малая Топка, Ользоны, Петровск-Забайкальский, Саянск, Северобайкальск , Улан-Удэ – 4 балла; Качуг, Железногорск-Илимский – 3–4 балла; Усть-Илимск – 3 балла по шкале ШСИ-2017 [4].

В 2020 г. на территории Приамурья и Приморья зафиксировано 4 землетрясения с $m_b \geq 4.2$. Данные о двух ощутимых событиях (одно на территории Китая) приведены в табл. 1.

На о. Сахалин и в прилегающей акватории Охотского моря в 2020 г. зафиксированы 11 землетрясений с $m_b \geq 3.6$, из них 10 ощутимых с $m_b \geq 3.6$ (см. табл. 1). Самое сильное землетрясение произошло 30.11.2020 г., и имело магнитуду $m_b = 6.4$ и вызвало интенсивность сотрясений в населенных пунктах Южно-Сахалинск, Чехов, Горнозаводск, Томари, Троицкое, Синегорск, Новотроицкое – 2–3 балла по шкале ШСИ-2017. Его эпицентр располагался на глубине 590 км в Татарском проливе. Три из зарегистрированных землетрясений произошли на глубинах $h = 360$, 410, 450 км, остальные на глубинах $h = 5$–15 км.

В 2020 г. на территории Курило-Охотского региона зарегистрированы 161 землетрясение с магнитудой $m_b \geq 3.4$, из них – 32 ощутимых землетрясения с магнитудами $m_b \geq 3.7$, которые сопровождались сейсмическими воздействиями в близлежащих населенных пунктах с силой до 5–6 баллов по шкале ШСИ-2017. Данные о 21 ощутимом землетрясении с магнитудой $m_b \geq 4.5$ (7 – на территории Японии) приведены в табл. 1. Самое сильное землетрясение произошло 13.02.2020 г. на глубине $h = 150$ км с $m_b = 7.2$ ($MS = 6.5$) в Охотском море у западного побережья Курильских островов. Оно сопровождалось сейсмическими воздействиями в близлежащих населенных пунктах силой до 5–6 баллов по шкале ШСИ-2017.

На обширной территории, включающей Якутию, Северо-Восток России и Чукотку, зарегистрировано 3 землетрясения с $m_b \geq 4.4$, ощутимых не было.

В 2020 г. на территории Камчатки, Северо-Курильских и Командорских островов зафиксировано 242 землетрясения с $m_b \geq 3.3$, из них – 25 землетрясений сопровождались сейсмическими воздействиями в близлежащих населенных пунктах с силой до 5–6 баллов по шкале ШСИ-2017 (см. табл. 1). Самое сильное землетрясение на глубинах очага $h \leq 70$ км произошло 25.03.2020 г. на глубине $h = 60$ км с $m_b = 7.2$ ($MS = 7.5$) восточнее Курильских островов, оно ощущалось в Северо-Курильске силой до 5–6 баллов по шкале ШСИ-2017. Это землетрясение сопровождались большим колличеством афтершоков. Самое сильное землетрясение на глубинах очага $h \geq 70$ км произошло 15.09.2020 г. на глубине 350 км в центральной части Камчатки и имело магнитуду $m_b = 6.0$, оно ощущалось в Петропавловске-Камчатском и Южно-Курильске силой до 2 баллов по шкале ШСИ-2017.

ВЫВОДЫ

2020 г. оказался весьма спокойным в сейсмическом отношении на территории России. Седьмой год подряд (2014–2020 гг.) землетрясения (как природные, так и техногенные) не вызвали на всей территории России никаких разрушений. Но следует отметить активизацию сейсмического процесса на территории Прибайкалья и Забайка-

Таблица 1. Проявление макросейсмического эффекта от ощутимых землетрясений на территории России в 2020 г.

Дата, время (чч:мм)	Широта, N, град.	Долгота, E, град.	Глубина, км	m_b (MS)	Регион	Ощутимость, баллы
Западный Кавказ						
26.01.2020 21:01:39	42.75	44.25	10	4.2	Республика Северная Осетия–Алания	Хидикус, Лац, Урикау, Верхний Фиагдон, Дзивгис, Верхний Унал – 4–5; Нар, Бурон, Верхний Цей – 4; Тамиск, Кобан – 3, Алагир, Суадаг, Чми, Джейрах – 2–3; Балта, Ногкау – 2
15.03.2020 05:35:58	44.55	37.08	10	4.2	Черное море	Анапа, Су-Псех – 2–3, Новороссийск – 2
29.08.2020 09:40:17	44.15	42.75	5	3.9	Ставропольский край	Железноводск, Минеральные воды – 2–3
12.12.2020 14:54:23	44.63	37.27	10	4.3	Черное море	Анапа – 4–5, Новороссийск – 4
Восточный Кавказ						
20.04.2020 12:53:06	42.13	46.25	10	4.0	Республика Дагестан	Бежта – 2–3
13.05.2020 14:51:14	43.10	46.67	10	4.1	Там же	Хасавюрт, Дылым, Калининаул, Аксай, Карланюрт – 2–3
11.06.2020 16:32:52	42.62	46.18	15	3.6	Там же	Агвали – 2–3
03.11.2020 12:16:45	42.21	49.05	45	4.7	Каспийское море	Махачкала – 2–3, Ахты – 2
05.11.2020 21:23:58	43.2	46.51	10	3.6	Республика Дагестан	Хасавюрт – 2–3
12.12.2020 21:29:50	43.08	45.52	10	4.7	Чеченская Республика	Урус-Мартан, Чечен-Аул, Грозный, Ачхой-Мартан, Гой-Чу, Мартан-Чу, Танги-Чу, Рошни-Чу, Гехи, Ва-лерик, Гикало, Старые Атаги, Катар-Юрт, Гойты – 5; Шали, Аргун, Цоци-Юрт, Серноводское, Самашки, Ассиновская, Автуры – 4; Махачкала – 2–3
12.12.2020 23:50:22	43.09	45.55	10	4.1	Там же	Урус-Мартан, Грозный, Ачхой-Мартан, Чечен-Аул – 3; Шали – 2
13.12.2020 11:34:19	43.12	45.49	10	4.8	Там же	Урус-Мартан, Чечен-Аул, Грозный, Ачхой-Мартан, Старые Атаги – 4; Шали, Аргун, Цоци-Юрт – 3
13.12.2020 13:05:02	43.05	45.49	10	4.5	Там же	Урус-Мартан, Чечен-Аул, Грозный, Шали, Ачхой-Мартан – 3
Арктический регион						
08.01.2020 12:07:45	86.28	37.30	10	5	Севернее Земли Франца-Иосифа	
10.01.2020 17:57:36	83.42	114.97	10	4.3	Севернее Северной Земли	
12.01.2020 7:25:13	82.15	118.08	10	4.8	Там же	
27.01.2020 14:24:45	80.80	121.90	10	5.2	Восточнее Северной Земли	
12.04.2020 11:57:09	78.92	123.04	10	4.4	Там же	
28.07.2020 19:07:32	77.84	126.52	10	4.5	Море Лаптевых	
04.08.2020 14:52:15	83.50	115.400	10	4.8	Севернее Северной Земли	
Прибайкалье и Забайкалье						
13.02.2020 23:52:59	56.85	117.68	15	3.6	Забайкальский край	Чара – 3
03.03.2020 07:16:58	49.04	104.41	33	4.1	Монголия	Закаменск – 3–4, Иркутск, Ангарск– 2
21.04.2020 13:20:32	51.26	107.37	15	3.7	Республика Бурятия	Барыкино, Мухоршибирь, Куйтун, Нижний Саянтуй, Шабур – 3–4; Улан-Удэ – 3

Таблица 1. Продолжение

Дата, время (чч:мм)	Широта, N, град.	Долгота, E, град.	Глубина, км	m_b (MS)	Регион	Ощутимость, баллы
08.06.2020 21:53:28	53.57	108.15	10	3.9	Озеро Байкал	Узуры – 3–4, Онгурен – 2
13.06.2020 07:36:22	51.60	102.05	10	4.4	Республика Бурятия	Кырен – 4–5, Тибельти – 4, Иркутск, Шелехов, Олха, Баклаши – 3
20.06.2020 07:15:42	51.14	108.61	10	4.0	Забайкальский край	Куйтун – 4–5, Мухоршибирь – 4
06.07.2020 11:50:17	51.79	104.46	10	4.3	Иркутская область	Байкальск – 4–5, Иркутск, Ангарск, Шелехов, Куйтун, Баклаши, Большой Луг, Танхой, Чистые Ключи, Выдрино, Грановщина, Пивовариха, Подкаменная, Марково, Максимовщина, Олха, Мамонах, Новая Раводная – 4; Усолье-Сибирское, Закаменск, Мегете, Утулик, Патроны, Моты, Плишкино, Мельничная Падь, Оёк, Савватеевка, Добролет, Молодежный, Малая Топка – 3–4; Улан-Удэ, Свирск,Усть-Ордынский, Улекчин – 3
24.07.2020 13:42:38	53.35	108.74	20	4.2	Республика Бурятия	Максимиха – 5, Суво, Уро, Баргузин, Усть-Баргузин – 4, Онгурен – 2–3
21.09.2020 18:04:58	51.82	103.4	10	5.5 (5.2)	Иркутская область	Култук, Быстрая – 6–7; Слюдянка, Тибельти – 6; Иркутск, Урик, Маркова, Белореченский, Мамоны, Шелехов, Введенщина, Чистые Ключи, Голубе Ели, Роял Парк, Ангарск, Усолье-Сибирское, Закаменск, Карлук, Листвянка, Моты, Мегет, Оёк, Оса, Хомутово – 5; Черемхово, Байкальск, Усть-Куда, Бохан, Дзержинск, Куда, Средний, Тулун – 4–5; Молодежный, Свирск, Утулик, Кяхта, Харанжино, Бозой, Братск, Грановщина, Еланцы, Зима, Малая Топка, Ользоны, Петровск-Забайкальский, Саянск, Северобайкальск, Улан-Удэ – 4; Качуг, Железногорск-Илимский – 3–4; Усть-Илимск – 3
21.09.2020 18:19:55	51.8	103.45	10	4.9	Там же	Иркутск – 4
01.10.2020 18:59:35	52.25	106.58	10	3.8	Республика Бурятия	Иркутск – 3, Шелехов– 2–3
22.10.2020 13:38:52	52.08	99.85	10	4.3	Там же	Орлик – 3
05.11.2020 03:01:32	49.65	108.9	10	5.1	Забайкальский край	Бичура – 3–4, Улан-Удэ, Закаменск – 3
10.11.2020 06:49:57	56.38	113.86	10	4.5	Республика Бурятия	Северомуйск – 3, Таксимо – 2
15.11.2020 06:18:27	53.2	100.55	10	4.1	Иркутская область	Зима, Саянск – 2
03.12.2020 12:37:10	55.86	111.04	15	4.9	Республика Бурятия	Кумора – 5
						Корсаково – 5–6, Селенгинск, Кабанск, Каменск, Творогово, Шигаево, Ангарск, Иркутск, Улан-Удэ, Середкина, Хомутово, Усолье-Сибирское, Куйтун, Дзержинск, Оймур, Усть-Куда, Ангарские Хутора, Шелехов, Черемхово,

Таблица 1. Продолжение

Дата, время (чч:мм)	Широта, N, град.	Долгота, E, град.	Глубина, км	m_b (MS)	Регион	Ощутимость, баллы
09.12.2020 21:44:33	52.46	106.78	10	5.3 (5.4)	Там же	Марково, Белореченский, Большое Голоустное, Первомайский, Тырган – 5; Введенщина, Ревякина, Баклаши, Мухоршибирь, Калиновка, Саган-Нура, Пивовариха, Гусиноозёрск, Карлук, Грановщина, Свирск, Зуй, Средний, Оёк, Бохан, Малая Топка, Урик, Смоленщина, Добролёт, Усолье-7 – 4–5; Саянск, Слюдянка, Куда, Зима, Голубые Ели, Большая Речка, Култук, Залари, Ширяева, Олха, Усть-Ордынский, Сарма, Жигалово, Харанцы, Михайловка, Молодежный, Новомальтинск, Бозой, Мегет, Закаменск – 4; Нижнеудинск – 3–4, Чита, Магистральный, Зеленогорск – 3; Корсаково – 5–6; Селенгинск, Кабанск, Каменск, Творогово, Шигаево, Ангарск, Иркутск, Улан-Удэ, Середкина, Хомутово, Усолье-Сибирское, Куйтун, Дзержинск, Оймур, Усть-Куда, Ангарские Хутора, Шелехов, Черемхово, Марково, Белореченский, Большое Голоустное, Первомайский, Тырган – 5; Введенщина, Ревякина, Баклаши, Мухоршибирь, Калиновка, Саган-Нура, Пивовариха, Гусиноозёрск, Карлук, Грановщина, Свирск, Зуй, Средний, Оёк, Бохан, Малая Топка, Урик, Смоленщина, Добролёт, Усолье-7 – 4–5; Саянск, Слюдянка, Куда, Зима, Голубые Ели, Большая Речка, Култук, Залари, Ширяева, Олха, Усть-Ордынский, Сарма, Жигалово, Харанцы, Михайловка, Молодежный, Новомальтинск, Бозой, Мегет, Закаменск – 4; Нижнеудинск – 3–4, Чита, Магистральный, Зеленогорск – 3; Корсаково – 5–6, Селенгинск, Кабанск, Каменск, Творогово, Шигаево, Ангарск, Иркутск, Улан-Удэ, Середкина, Хомутово, Усолье-Сибирское, Куйтун, Дзержинск, Оймур, Усть-Куда, Ангарские Хутора, Шелехов, Черемхово, Марково, Белореченский, Большое Голоустное, Первомайский, Тырган – 5; Введенщина, Ревякина, Баклаши, Мухоршибирь, Калиновка, Саган-Нура, Пивовариха, Гусиноозёрск, Карлук, Грановщина, Свирск, Зуй, Средний, Оёк, Бохан, Малая Топка, Урик, Смоленщина, Добролёт, Усолье-7 – 4–5; Саянск, Слюдянка, Куда, Зима, Голубые Ели, Большая Речка, Култук, Залари, Ширяева, Олха, Усть-Ордынский, Сарма, Жигалово, Харанцы, Михайловка, Молодежный, Новомальтинск, Бозой, Мегет, Закаменск – 4;

Таблица 1. Продолжение

Дата, время (чч:мм)	Широта, N, град.	Долгота, E, град.	Глубина, км	m_b (MS)	Регион	Ощутимость, баллы
						Нижнеудинск – 3–4, Чита, Магистральный, Зеленогорск – 3; Корсаково – 5–6, Селенгинск, Кабанск, Каменск, Творогово, Шигаево, Ангарск, Иркутск, Улан-Удэ, Середкина, Хомутово, Усолье-Сибирское, Куйтун, Дзержинск, Оймур, Усть-Куда, Ангарские Хутора, Шелехов, Черемхово, Марково, Белореченский, Большое Голоустное, Первомайский, Тырган – 5; Введенщина, Ревякина, Баклаши, Мухоршибирь, Калиновка, Саган-Нура, Пивовариха, Гусиноозёрск, Карлук, Грановщина, Свирск, Зуй, Средний, Оёк, Бохан, Малая Топка, Урик, Смоленщина, Добролёт, Усолье-7 – 4–5; Саянск, Слюдянка, Куда, Зима, Голубые Ели, Большая Речка, Култук, Залари, Ширяева, Олха, Усть-Ордынский, Сарма, Жигалово, Харанцы, Михайловка, Молодежный, Новомальтинск, Бозой, Мегет, Закаменск – 4; Нижнеудинск – 3–4, Чита, Магистральный, Зеленогорск – 3
09.12.2020 21:49:57	52.31	106.57	10	4	Там же	Корсаково, Оймур, Куйтун – 3–4
10.12.2020 14:20:02	52.4	106.44	10	4.9	Там же	Иркутск, Ангарск, Марково, Шелехов, Тырган, Корсаково, Карлук, Бозой, Бохан, Горячий ключ, Хомутово, Усть-Ордынский, Попова, Петрова, Большая Елань, Пивовариха, Дзержинск, Введенщина, Улан-Удэ, Еланцы – 4; Усолье-Сибирское, Верхний Кет, Миловиды, Малая Топка, Порт Байкал, Новая Разводная, Грановщина, Мамоны, Молодежный, Куда – 3–4; Парфеново, Зима – 3
16.12.2020 17:43:41	52.41	106.21	10	3.9	Республика Бурятия	Еланцы, Тырган, Петрова, Попова – 3–4; Иркутск, Улан-Удэ, Маркова, Шелехов, Хомутово, Ангарск – 3; Усолье-Сибирское, Култук – 2–3
29.12.2020 00:31:53	56.23	114.05	10	4.9	Там же	Северомуйск, Таксимо, Бодайбо, Мамакан – 4, Чита – 3
Приамурье и Приморье						
04.02.2020 03:48:42		127.22	10	4.2	Амурская область	Зея – 2–3
07.02.2020 00:12:40		125.38	10	4.6	Северо-Восточный Китай	Благовещенск, Константиновка – 2–3
Сахалин и прилегающие акватории						
03.01.2020 20:46:39	48.95	142.34	15	3.6	Сахалин	Углегорск, Шахтерск – 4
23.01.2020 06:22:39	46.54	142.41	10	4.2	Там же	Анива – 3–4, Невельск, Корсаков – 3
15.04.2020 21:56:55	53.72	144.30	10	3.7	Охотское море	Ныврово – 3
02.07.2020 13:47:50	48.1	142.5	5	3.9	Сахалин	Тихая, Пугачёво, Арсентьевка – 3

Таблица 1. Продолжение

Дата, время (чч:мм)	Широта, N, град.	Долгота, E, град.	Глубина, км	m_b (MS)	Регион	Ощутимость, баллы
13.09.2020 13:42:26	48.96	142	10	5.1	Там же	Углегорск, Краснополье, Поречье – 5; Ольховка – 4–5, Шахтерск, Медвежье – 4, Поронайск – 3
13.09.2020 14:09:02	48.91	142.15	10	4.7	Там же	Углегорск – 4
13.09.2020 20:49:32	48.91	142.14	10	3.9	Там же	Углегорск – 2–3
08.10.2020 02:02:32	48.95	142.25	10	3.9	Там же	Медвежье, Краснополье – 3
08.11.2020 13:29:22	52.93	142.9	10	4.8	Там же	Оха, Тунгор – 3
30.11.2020 22:54:34	48.26	140.85	590	6.4	Татарский пролив	Южно-Сахалинск, Чехов, Горнозаводск, Томари, Троицкое, Синегорск, Новотроицкое – 2–3
Курило-Охотский регион						
11.01.2020 15:55:40	43.41	146.37	50	4.7	Курильские острова	Малокурильское – 4
15.01.2020 11:31:34	42.94	145.16	90	5.3	Район Хоккайдо	Малокурильское– 3, Южно-Курильск – 2–3,
28.01.2020 01:36:03	43.52	145.99	95	5.8	Там же	Южно-Курильск – 4, Малокурильское – 3–4
29.01.2020 06:14:02	44.37	148.26	50	4.6	Курильские острова	Рейдово – 2
13.02.2020 10:33:44	45.68	148.95	150	6.4 (6.1)	Там же	Горное, Горячие Ключи – 5–6; Крабозаводское, Головнино, Горячий Пляж, Китовое, Курильск, Лагунное, Малокурильское, Менделеево, Рейдово, Южно-Курильск – 5
07.03.2020 05:02:06	44.96	148.22	120	4.7	Там же	Малокурильское, Крабозаводское – 2
13.04.2020 01:42:53	48.26	154.45	60	5.2	Там же	Северо-Курильск – 2–3
30.04.2020 03:15:21	40.91	142.8	33	5.2	Восточное побережье Хонсю	Южно-Курильск, Горячий Пляж – 2
03.05.2020 05:17:54	44.31	148.22	50	4.7	Курильские острова	Горное – 2–3
30.05.2020 18:13:48	42.62	143.87	100	6	Район Хоккайдо	Южно-Курильск, Горячий Пляж, Головнино, Лагунное – 3–4, Малокурильское – 3
07.06.2020 04:05:53	43.92	148.00	40	4.5	Курильские острова	Горное – 2–3
16.06.2020 06:36:14	43.10	146.19	80	4.8	Там же	Южно-Курильск – 3, Малокурильское, Крабозаводское – 2
02.07.2020 07:07:25	43.8	147.79	60	5.5	Там же	Малокурильское – 4, Южно-Курильск, Крабозаводское – 3
09.07.2020 05:14:01	45.65	149.7	145	5.2	Там же	Курильск, Рейдово – 3, Южно-Курильск – 2–3
14.07.2020 13:21:08	44.07	147.1	90	5.4	Там же	Малокурильское – 4–5
17.07.2020 06:10:46	44.75	147.59	140	5.2	Там же	Южно-Курильск, Горный – 3–4; Горячий, Головнино, Малокурильское – 3
27.08.2020 14:14:52	44.44	148.23	60	4.9	Там же	Малокурильское – 3
02.09.2020 10:35:44	43.15	145.8	60	5.1	Район Хоккайдо	Южно-Курильск – 3
05.09.2020 12:06:51	43.63	147.14	50	4.6	Курильские острова	Малокурильское – 3–4
12.09.2020 02:44:11	38.75	142.27	33	6.4 (6.1)	Восточное побережье Хонсю	Южно-Курильск, Горячий Пляж – 2
16.12.2020 01:28:07	42.76	144.26	60	5.2	Район Хоккайдо	Южно-Курильск, Малокурильское, Горячий Пляж, Головнино, Дубовое – 2

Таблица 1. Окончание

Дата, время (чч:мм)	Широта, N, град.	Долгота, E, град.	Глубина, км	m_b (MS)	Регион	Ощутимость, баллы
Камчатка, Северо-Курильские и Командорские острова						
01.01.2020 03:53:25	52.57	159.45	45	4.9	У восточного побережья Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 3
16.01.2020 16:31:12	52.06	159.57	60	5.4	Там же	Петропавловск-Камчатский – 2–3
22.01.2020 11:04:12	54.81	161.72	60	5.4	Восточное побережье Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2–3
28.01.2020 04:19:46	52.44	159.36	40	4.6	У восточного побережья Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2–3
29.01.2020 02:44:45	54.51	158.77	235	5.1	Камчатка	Петропавловск-Камчатский – 2
20.02.2020 18:57:37	53.63	160.51	50	6.3 (5.6)	Восточное побережье Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 3–4
07.03.2020 00:03:32	49.99	156.66	50	4.2	Курильские острова	Северо-Курильск – 2
12.03.2020 05:20:11	52.49	159.03	70	4.8	У восточного побережья Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2–3
25.03.2020 02:49:21	48.99	157.63	60	7.2 (7.5)	Район Курильских островов	Северо-Курильск – 5–6, Петропавловск-Камчатский – 4–5, Южно-Курильск – 3
25.03.2020 17:21:47	49.25	158.08	50	5.5	Там же	Северо-Курильск – 3
07.04.2020 06:27:21	49.17	157.99	50	5.3	Там же	Северо-Курильск – 3
14.05.2020 01:22:51	51.07	158.13	65	4.7	Восточное побережье Камчатки	Северо-Курильск – 2
30.05.2020 11:01:34	52.99	159.16	120	4.7	У восточного побережья Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2–3
14.06.2020 21:23:24	49.18	158.05	50	5.4	Район Курильских островов	Северо-Курильск – 2–3
07.08.2020 03:41:12	52.34	158.9	80	4.8	Восточное побережье Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2–3
25.08.2020 21:53:48	52.97	159.65	60	4.6	У восточного побережья Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2
09.09.2020 22:11:27	50.64	157.2	60	4.6	Курильские острова	Северо-Курильск – 2–3
14.09.2020 10:08:37	50.82	157.27	60	4.7	Там же	Северо-Курильск – 4
15.09.2020 03:41:27	55.87	158.55	350	6 (6)	Камчатка	Петропавловск-Камчатский, Южно-Курильск – 2
05.10.2020 09:04:31	52.29	158.76	100	4.5	Восточное побережье Камчатки	Петропавловск-Камчатский– 2–3
11.10.2020 11:21:49	50.42	156.95	50	4.5	Курильские острова	Петропавловск-Камчатский – 2
13.11.2020 22:18:12	50.5	157.25	50	4.6	Там же	Северо-Курильск – 3
27.11.2020 18:45:09	49.88	156.51	60	5.4	Там же	Северо-Курильск – 4
27.11.2020 22:57:15	52.13	159.77	33	4.9	У восточного побережья Камчатки	Петропавловск-Камчатский – 2
25.12.2020 03:35:40	50.88	158.11	40	4.1	Район Курильских островов	Северо-Курильск – 2–3

лья – 36 землетрясений (в 2019 г. – 22), из них ощутимых – 21 (в 2019 г. – 9). Всего за период с 1 января по 31 декабря в оперативном режиме Службой срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН было зарегистрировано 651 землетрясение с $m_b \geq 3.1$.

Самыми сильными по *магнитуде* на территории РФ оказались землетрясения, произошедшие:

– 13.02.2020 г на глубине $h = 150$ *км* с m_b =7.2 (MS = 6.6) в Охотском море у западного побережья Курильских островов, оно ощущалось в Горном, Горячих Ключах силой 5-6 баллов, в Крабозаводском, Головнино, Горячем Пляже, Китовом, Курильске, Лагунном, Малокурильском, Менделеево, Рейдово, Южно-Курильске силой 5 баллов по шкале ШСИ-2017;

– 25.03.2020 г. на глубине h = 60 км с m_b =7.2 (MS = 7.5) восточнее Курильских островов, оно ощущалось в Северо-Курильске силой 5–6 баллов, в Петропавловске-Камчатском силой 4–5 баллов и в Южно-Курильске силой 3 балла по шкале ШСИ-2017.

Самым сильным по воздействию стало Быстринское землетрясение, произошедшее 21.09.2020 г. в Иркутской области с m_b = 5.5 (MS = 5.2). Наибольшая интенсивность сотрясений, оцениваемая в 6–7 баллов по шкале ШСИ-2017 [4], наблюдалась в пос. Култук и д. Быстрая.

Макросейсмические проявления в 2020 г. были отмечены для 111 землетрясений в 232 населенных пунктах России. Этот показатель выше аналогичного показателя за 2019 г. (83 землетрясения проявлялись для 192 населенных пунктов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. База данных “Землетрясения” Службы срочных донесений. Информационные ресурсы ФИЦ ЕГС РАН // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. URL:http://www.ceme.gsras.ru/new/infres/. (дата обращения 13.01.2021).
2. *Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Пойгина С.Г., Петрова Н.В., Коломиец М.В.* Сильные землетрясения земного шара и России в I полугодии 2020 г. по данным ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 3. С. 7–21
3. Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. 211 с.
4. Каталог землетрясений текущего года // Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН. URL:http://www.seis-bykl.ru/modules.php?name=Main&nowear=nowear#cat (дата обращения 28.12.2020).
5. *Маловичко А.А., Диденко В.И., Яцало Б.И.* Автоматизированная система и анализа макросейсмических данных об ощутимых землетрясениях в режиме реального времени // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Девятой Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 209–213.
6. *Маловичко А.А., Коломиец М.В., Рузайкин А.И.* Сейсмичность России в 2019 году // Геоэкология. 2020. № 3. С. 139–148.
7. *Маловичко А.А., Старовойт О.Е.* Геофизическая служба РАН: состояние и развитие // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. Отв. ред. А.О. Глико. М.: Янус–К, 2013. С. 45–56.
8. *Старовойт О.Е., Коломиец М.В., Рузайкин А.И.* Сейсмичность России в 2012 году // Геоэкология. 2014. № 5. С. 450–456.
9. *Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В., Рыжикова М.И.* Служба срочных донесений ГС РАН // Землетрясения Северной Евразии в 2012 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 257–263.

SEISMICITY OF RUSSIA IN 2020

A. A. Malovichko[a,#], M. V. Kolomiets[a,##], and A. I. Ruzaykin[b,###]

[a] *Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, ul. Lenina, 189, Obninsk, Kaluga oblast, 249035 Russia*

[b] *Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, ul. B. Gruzinskaya, 10, Moscow, 123995 Russia*

[#] *E-mail: amal@gsras.ru*

[##] *E-mail: kolmar@gsras.ru*

[###] *E–mail: a.ruzaykin@yandex.ru*

Results on monitoring seismicity in 2020 are given for the main regions and territories of Russia: Western and East Caucasus; East European Platform, Ural and West Siberia; Arctic Basin; Altai and Sayan Mountains; Lake Baikal region; Amur River region; Primor'e; Sakhalin; Kuril-Okhotsk Region; Yakutia; North-East region of Russia and Chukotka; Kamchatka and Komandor Islands. Catalogs of the most significant earthquakes are provided for each region with parameters of the hypocenters and magnitudes received from instrumental observation. Manifestation of macroseismic effect from the majority of noticeable earthquakes (with $I \geq 2.5$ points on SSI-2017 scale) that occurred in the territory of Russia is analyzed. The work is intended for seismologists, geophysicists, geologists and specialists in earthquake-prone construction.

Keywords: *seismic station*, *seismicity monitoring*, *magnitudes*, *macroseismic effect*

REFERENCES

1. *Baza dannykh "Zemletryaseniya" Sluzhby srochnykh donesenii. Informatsionnye resursy FITS YEGS RAN* [Database "Earthquakes" of the Urgent Reporting Service. Information resources of the Federal Research Center of the EGS RAS]. URL: http: //www.ceme.gs-ras.ru/new/infres/. (accessed: 13.01.2021).
2. Vinogradov, Yu.A., Ryzhikova, M.I., Poigina, S.G., Petrov,a N.V., Kolomiets, M.V. *Sil'nye zemletryaseniya zemnogo shara i Rossii v I polugodii 2020 g. po dannym FITS YEGS RAN* [Strong earthquakes of the globe and Russia in the first half of 2020 according to the Federal Research Center of the EGS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 7–21. (in Russian)
3. *Zemletryaseniya Rossii v 2018 g.* [Earthquakes in Russia in 2018]. Obninsk, GS RAS, 2020, 211 p. (in Russian)
4. *Katalog zemletryasenii tekushchego goda* [Catalog of earthquakes of the current year]. Baikal branch of FRC EGS RAS]. URL: http: //www.seis-bykl.ru/modules.php? Name = Main & nowear = nowear # cat (date of treatment 12/28/2020).
5. Malovichko, A.A., Didenko, V.I., Yatsalo, B.I. *Avtomatizirovannaya sistema i analiz makroseismicheskikh dannykh ob oshchutimykh zemletryaseniakh v rezhime real'nogo vremeni* [The automated system and the analysis of macroseismic data on noticeable earthquakes in real time]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Mater. IX Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. IX Intern. Seismological Workshop]. Obninsk, GS RAS, 2014, pp. 209-213. (in Russian)
6. Malovichko, A.A., Kolomiets, M.V., Ruzaikin, A.I. *Seismichnost' Rossii v 2019 godu* [Seismicity in Russia in the year 2019]. *Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 139–148. (in Russian)
7. *Malovichko, A.A., Starovoit, O.E.* Alert Service at GS RAS: a state-of-art and development. *Aktual'nost' idei G.A. Gamburtseva v geofizike XXI veka* [Relevance of G.A. Gamburtsev ideas in geophysics for the XXI century]. *A.O. Gliko*, Editor-in-Chief. Moscow, Yanus-K Publ., 2013, pp. 45–56. (in Russian)
8. Starovoit, O.E., Kolomiets, M.V., Ruzaikin, A.I. *Seismichnost' Rossii v 2012 godu* [Seismicity in Russia in the year 2012]. *Geoekologiya*, 2014, no. 5, pp. 450–456. (in Russian)
9. Starovoit, O.E., Chepkunas, L.S., Kolomiets, M.V., Ryzhikova, M.I. Alert Service at GS RAS. *Zemletryaseniya Severnoi Evrazii v 2012 g.* [Earthquakes in the Northern Eurasia, 2012]. Obninsk, GS RAS, 2018, pp. 257–263. (in Russian)

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 34–44

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК: 550.72;550.73;551.244.1;551.244.2;551.35.061;551.35.063;551.466

НОВЫЙ ПОДХОД К ВЫДЕЛЕНИЮ ГРАНИЦ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

© 2021 г. Ю. В. Черняк[1,*], А. А. Фалалеева[1,], А. В. Брушков[1,***]**

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991 Россия

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

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

****E-mail: brouchkov@hotmail.com*

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.
После доработки 10.08.2021 г.
Принята к публикации 10.08.2021 г.

Наличие засоления мерзлых пород на тех или иных территориях Арктического побережья Северного Ледовитого океана не всегда можно объяснить воздействием морской трансгрессии (морской тип засоления) и криогенным концентрированием или концентрированием солей из-за обезвоживания пород (континентальный тип засоления). В статье представлены новые факты, которые могут объяснить образование засоления в многолетнемерзлых породах на значительных высотах над уровнем моря, и впервые приводятся возможные гипотезы образования засоленных мерзлых пород, объясняемые нагонными подъемами уровня моря и цунами в недавнем геологическом прошлом, новейшей тектоникой и биогенным засолением. Приведенные данные позволили авторам графически представить новый вариант схемы распространения мерзлых засоленных пород в северном полушарии. Граница морского типа засоления установлена по максимальной бореальной трансгрессии, граница континентального типа засоления проведена на основе анализа и сопоставления карты атмосферных осадков и испаряемости путем выделения тех участков, где испарение преобладает над осадками. Показано значительное увеличение площадей с морским и континентальным типом засоления горных пород Арктического побережья. Для высокогорных районов установлено, что уровень максимальной трансгрессии четвертичного времени не доходил до высоких отметок, к тому же климат данных участков далек от континентального.

Ключевые слова: *засоление*, *многолетнемерзлые породы*, *Арктика*, *цунами*, *тектоника*, *микроорганизмы*, *морская трансгрессия*

DOI: 10.31857/S0869780921050039

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики России связано, в том числе, с освоением новых месторождений нефти и газа, а также других полезных ископаемых на Арктическом побережье и шельфе Северного Ледовитого океана. Строительство и эксплуатация жилых поселков, крупных транспортных объектов на распространенных в этом регионе засоленных мерзлых породах осложняет освоение Арктического побережья. Поэтому проблема уточнения образования засоленных мерзлых пород, связанная с особенностями их распространения, является актуальной [5].

В настоящее время засоленные мерзлые породы по-прежнему не охвачены должным изучением из-за их распространения в основном в труднодоступных районах и методических сложностей определения типа засоления. Тем не менее, необходимо продолжать изучение особенностей их формирования и распространения, поскольку данные породы отличаются низкой несущей способностью и неустойчивостью к техногенным воздействиям. Эти особенности связаны с тем, что засоленные мерзлые породы занимают по многим своим свойствам положение между мерзлыми и немерзлыми породами [5].

Известны следующие способы образования засоления в многолетнемерзлых породах: воздействие морской трансгрессии (морской тип засоления) и криогенное концентрирование, а также концентрирование солей из-за обезвоживания пород (континентальный тип засоления). Причем морские условия образования преобладают над континентальными для пород четвертичного возраста, распространенных на дневной поверхности Арктического побережья. Однако этими механизмами не всегда можно объяснить наличие засоления мерзлых пород на тех или иных

территориях Арктического побережья Северного Ледовитого океана.

Обобщение сведений по распространению мерзлых засоленных пород для различных участках или всей территории Арктического побережья приведены в [5, 10, 17, 21, 23, 27]. Однако следует отметить, что фактические сведения о распространении мерзлых засоленных пород на данный момент являются неполными.

Цель настоящей работы – наряду с известными механизмами формирования засоления в многолетнемерзлых породах представить на обсуждение новые, которые, например, смогут объяснить образование засоления на значительных высотах над уровнем моря.

Перед авторами стояли следующие задачи:

1) рассмотреть последовательно каждый из возможных вариантов образования засоления в породах;

2) составить схему распространения засоленных мерзлых пород на Арктическом побережье, основанную на описанных ниже механизмах образования данных пород, с использованием имеющейся фактической информации об их наличии в различных частях Арктики, собранной российскими и зарубежными исследователями.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Г.И. Дубиков и Н.В. Иванова к мерзлым засоленным породам относят породы, содержащие легкорастворимые в воде соли [11]. Согласно ГОСТ 25100-2011[1], к засоленным мерзлым грунтам (по морскому типу) относятся пески, супеси, суглинки и глины, если их засоленность (отношение веса водорастворимых солей к весу минеральных частиц в единице объема грунта) превышает соответственно значения 0.05%, 0.15%, 0.2%.

Согласно СП 25.13330.2012 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах”[2] порог значения *Dsal* (степень засоленности, %), при котором грунт можно считать засоленным меняется в зависимости от вида грунта (песок, супесь, суглинок или глина), типа засоления (морской или континентальный), а также определяемой прочностной характеристики грунта (расчетное давление под нижним концом сваи, расчетное сопротивление сдвигу по поверхности смерзания, расчетное давление под подошвой столбчатого фундамента). Также в разделе 9 приводится следующее примечание: “Пылеватые грунты морского побережья Севера с преобладанием солей натрий-калиевого состава должны относиться к засоленным при содержании в них растворимых солей от 0.05% и выше”.

В.И. Панченко и В.И. Аксенов предложили следующее определение: грунт может считаться засоленным, если содержание ионов электролитов выше обменной емкости скелета [16]. По мнению А.В. Брушкова [5], правильнее говорить о легкорастворимых солях (а не только об электролитах) в поровом растворе. Если их содержание превышает величину, при которой фиксируется изменение физико-механических свойств грунтов и которая фактически близка к обычной точности определений засоленности 0.05%, такие породы можно считать засоленными. Таким образом, авторами работы предлагается следующее определение объекта исследования: засоленными являются мерзлые породы, содержащие в поровом растворе легкорастворимые соли в количестве, составляющем более 0.05% по весу в отношении к сухой породе [5].

НОВЫЕ ГИПОТЕЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ПОРОД АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Механизмы формирования морского типа засоления подробно описаны в [5, 7, 10, 19, 21]. Г.И. Дубиков [10] описывает процесс перехода засоленных донных отложений в береговые мерзлые толщи. А.В. Брушков [5] по соотношению времени образования породы и времени ее засоления выделяет синхронный и эпихронный типы засоления. И.Д. Стрелецкая [19] связывает формирование криопэгов на п-ове Ямал с промерзанием морских плейстоценовых отложений сразу после их выхода из-под уровня моря.

Опираясь на описанные выше представления, можно составить следующую схему формирования засоленных мерзлых пород на Арктическом побережье. Засоление пород происходит по морскому и континентальному типам, а также под действием биогенного фактора.

Засоление по морскому типу образуется во время морской трансгрессии, либо под действием приливов, нагонных волн, цунами. Механизм формирования засоленных мерзлых пород следующий. В результате повышения уровня моря происходит затопление территорий, т.е. переход из субаэрального в субаквальное состояние пород всех генотипов, их протаивание и засоление (рис. 1а). В случае трансгрессии (повышение уровня моря на длительное время) образуется первично засоленный морской осадок. При дальнейшем понижении уровня моря и переходе в субаэральные условия с отрицательными среднегодовыми температурами прекращается засоле-

[1] ГОСТ 25100-2011. ГРУНТЫ. Классификация. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095052

[2] СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. URL: https://docs.cntd.ru/document/9056423

ние, и начинается промерзание пород (рис. 1б), что провоцирует перераспределение солей в поровом пространстве. Происходит рассоление слоя сезонного оттаивания в результате опреснения атмосферными осадками и действия процесса криогенного концентрирования (рис. 1в), а также перераспределение солей в зависимости от состава пород.

Важно, что при промерзании глинистых пород соли, как правило, двигаются вместе с потоком воды к фронту промерзания, увеличивая засоленность в промерзающей зоне. В песчаных породах, наоборот, наблюдается отжатие воды от фронта промерзания и концентрирование солей в остаточном растворе (так называемое “криогенное концентрирование”), которое может приводить к значительному накоплению солей ниже фронта промерзания и образованию криопэгов (рис. 1в) [4].

Необходимым условием континентального типа засоления является существование аридного климата на исследуемой территории, отличительной чертой которого является преобладание испарения над осадками. В результате происходит дегидратация и концентрирование солей в породе. Такие условия встречаются в Центральной Якутии, Южном Забайкалье и Монголии, однако могут встречаться и в высоких широтах, например, долине р. Маккензи и Гренландии [5, 27]. Но так как сочетание холодного и аридного климатов, как правило, не может продолжаться в течение длительного времени, мерзлые толщи с континентальным засолением не имеют большой мощности. Содержание солей в них колеблется в широких пределах – от 0.05 до 2% и более. В работах [24, 25] указывается на возможность формирования в породах засоления по континентальному типу в литоральной зоне пляжа.

Следует отметить, что химические составы солей морского и континентального типов засоления различны. Для морского типа характерно сходство с составом морской воды, породы же континентального типа имеют самый различный состав солей, который определяется их взаимодействием с поверхностными, подземными водами и атмосферными осадками.

Анализ данных по распространению трансгрессий в средний и поздний неоплейстоцен [12, 20] показал, что максимальный уровень, который они достигали на побережьях Белого и Баренцева морей, составляет 100–170 м (250 м для Кольского п-ва), Карского моря – 50–80 м, морей Лаптевых и Восточно-Сибирского – 25–50 м, Чукотского моря – 12 м. Эти уровни согласуются с данными по распространению мерзлых засоленных пород и свидетельствуют о важной роли трансгрессий в формировании засоления. Однако засоленные мерзлые породы обнаружены также и на участках, расположенных выше отметок, которых достигали данные трансгрессии [6]. Анализ метеорологических данных позволил заключить, что климат данных территорий далек от континентального.

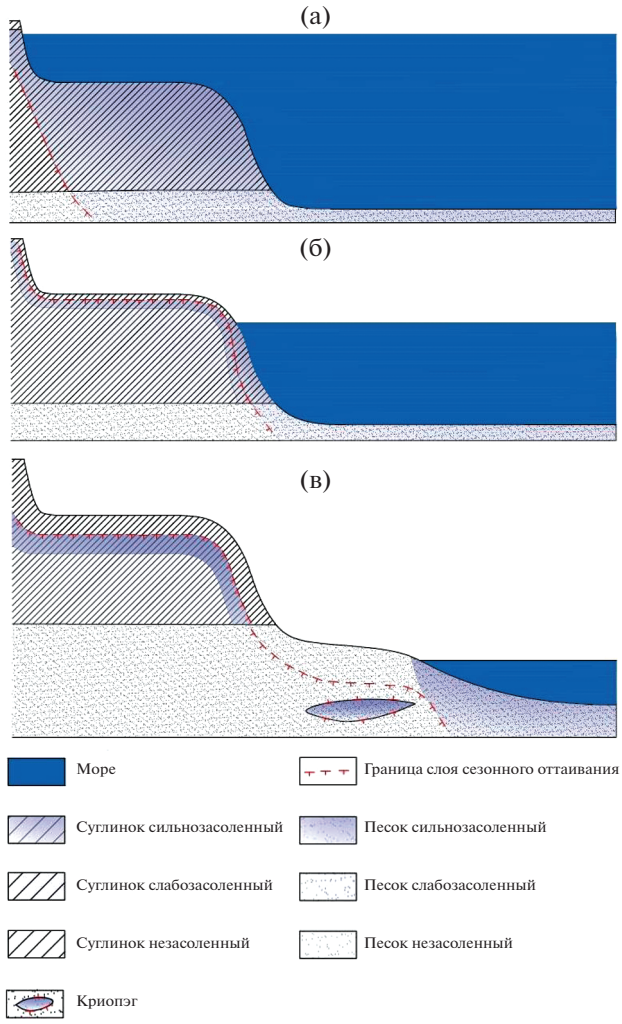


Рис. 1. Формирование засоленных мерзлых пород по морскому типу (пояснения в тексте).

Появление и накопление новых фактов в научных исследованиях последних десятилетий XXI в. позволяет авторам предложить к обсуждению три новых механизма образования засоленных пород Арктического побережья.

Механизм 1. Нагонные подъемы уровня моря и цунами

Нагонные подъемы уровня моря, как и приливы, как правило, не превышают нескольких метров и, несмотря на очевидную возможность участия в процессах засоления береговых отложений разного генезиса, имеют ограниченное значение.

Таблица 1. Основные характеристики ветровых волн и волн цунами [8]

Параметры	Ветровые волны	Цунами
Скорость распространения	До 100 км/ч	До 1000 км/ч
Длина волны	До 0.5 км	До 1000 км
Период	До 20 с	До 2.5 ч
Высота волны в открытом море	До 30 м	1–2 м
Высота волны у побережья	До 40 м	До 70 м

Цунами также могли являться источником формирования засоленных пород, обнаруженных на больших высотах. Механизм возникновения цунами объясняется в литературе [8] следующим образом. Волны цунами образуются под действием относительно быстрого вытеснения масс воды в результате сейсмотектонических подвижек земной коры, обвалов и оползней больших масс горных пород или донного осадочного материала, а также взрывов (извержений) на дне. Мощная водная стена цунами концентрирует в себе огромный энергетический потенциал. По мере приближения к берегу толща воды уменьшается, и, таким образом, энергия волны, идущей из эпицентра, расположенного на большой глубине, все более и более зажимается, концентрируясь во все уменьшающейся толще воды. В поверхностных водах по мере приближения к берегу, отмечается стремительный рост высоты волны. Волны, которые в открытом океане составляют в среднем 60 см в высоту, при вхождении в шельфовую зону океана теряют свою скорость, расстояние между волнами, следующими друг за другом, также сокращается, волны начинают накладываться одна на другую, что еще больше усиливает концентрацию энергии.

По данным, приведенным в табл. 1, можно сделать вывод, что высоты волн цунами значительно превышают ветровые волны и нагонные (а также приливные) подъемы уровня моря в недавнем геологическом прошлом.

Известно, что цунами большой интенсивности, характеризующиеся средним подъемом воды от 8 до 30 м, происходят приблизительно один раз в десять лет. Таким образом, вполне вероятно возникновение цунами еще большей интенсивности в течение плейстоцена, которые могли стать причиной образования засоленных пород на высотах до 70 м.

Согласно [28] экстремальные геофизические явления, такие как столкновения с астероидами и гигантские оползни, могут вызывать мегацунами с высотой волн, значительно превышающей те, которые наблюдаются при других формах цунами.

К сожалению, из-за сложных природно-климатических условий и малой населенности побережья Арктики практически отсутствуют данные инструментальных измерений и надежные исторические свидетельства о проявлениях цунами. Анализ имеющихся геолого-геофизических материалов, а также данных о сейсмичности за период инструментальных наблюдений (1918–2015 гг.) [14] показывает, что наиболее высоким сейсмическим потенциалом в пределах арктического региона характеризуются подводный Срединно-Арктический пояс землетрясений (межплитовая граница), а также отдельные районы континентального склона – в морях Баффина и Бофорта. Для Арктического побережья России и прилегающего шельфа наибольшая опасность возникновения цунами сейсмотектонического происхождения исходит от землетрясений, возникающих в зоне подводного хребта Гаккеля, являющегося восточной частью Срединно-Арктического пояса (рис. 2). В этой зоне возможно возникновение землетрясений магнитудой $Mw \sim 6.5–7.0$ с частотой 10^{-2} год$^{-1}$ и магнитудой $Mw \sim 7.5$ с частотой 10^{-3} год$^{-1}$ [14].

В [22, 26] показано, что единичное воздействие цунами приводит к засолению почв и грунтовых вод.

Механизм 2. Новейшая тектоника

Предполагаемой причиной нахождения засоленных мерзлых пород на больших высотных отметках являются новейшие тектонические движения. На Арктическом побережье существуют участки, испытывающие умеренные поднятия (Кольский п-ов, п-ов Канин, о-ва Северная Земля, п-ов Таймыр, Чукотское нагорье, а также Чукотский п-ов). Существование засоленных пород на высотах, превышающих уровень максимальной трансгрессии, на этих территориях можно объяснить новейшей тектоникой.

Чтобы оценить величину именно тектонических вертикальных движений без влияния эвстатической составляющей А.В. Баранская [4] провела следующие расчеты: из высот древних береговых линий вычиталось положение абсолютного уровня Мирового Океана в момент их формирования, согласно обобщенной среднемировой кривой для голоцена. Из полученных амплитуд и времени тектонического поднятия или опуска-

ния вычислялись скорости для каждой точки. Благодаря их последующему осреднению по тектоническим областям и крупным блокам за все время с 17 тыс. лет назад, гипотетически возможные наложенные отклонения эвстатического уровня моря в Арктике от общемирового, даже если они и наблюдались, должны составлять одно и то же значение. Поэтому возможно сравнение средних скоростей вертикальных тектонических движений в разных районах Арктики.

На основе анализа карты средних скоростей вертикальных движений земной коры за последние 17 тыс. лет, приведенной в [4], можно сделать вывод о преобладающем поднятии всех областей суши. Вертикальные движения положительного знака были характерны для западной части дна моря Лаптевых (1.5 мм/год) и юга Карского моря (0.6 мм/год). Глубоководные части шельфов, напротив, испытывали погружение. Наиболее интенсивно опускалась Баренцевоморская область (–12.9 мм/год), менее активно – Карская (–9.2 мм/год) и медленнее всего – Лаптевоморская (–0.4 мм/год в центральной части и – 3.8 мм/год в восточной части). В среднем, быстрее остальных структур поднимались Балтийский щит (до 8.4 мм/год, причем максимальные скорости характерны для Карельского блока), массив Земли Франца-Иосифа (4.3 мм/год), архипелаг Северная Земля (4.1 мм/год), Новосибирская область (3.9 мм/год) и Верхоянская область в районе Хараулахского хребта (3 мм/год). Ямало-Гыданская область Западно-Сибирской плиты, восточная часть Русской плиты и Таймырская складчатая область обладают схожими невысокими скоростями новейшего поднятия (1.5–2.5 мм/год), однако, судя по изменению скоростей во времени, механизмы их разные: движения Русской плиты связаны с динамикой Балтийского щита, в то время как вертикальные перемещения Западно-Сибирской плиты развиваются независимо. Наиболее стабильны в голоцене, в среднем, были Тимано-Печорская плита, мелководный шельф Ямало-Гыданской области и район дельты Яны. В целом, вертикальные движения в западной части Российской Арктики отличались контрастностью по сравнению с восточной. К примеру, разница средних скоростей вертикальных движений земной коры между соседними Балтийским щитом и Баренцевоморской областью, граничащими по системе разломов, называемой линией Карпинского, превышает 21 мм/год.

Механизм 3. Биогенное засоление

Живые организмы существуют и развиваются в породах на поверхности твердых минеральных частиц, в поровом растворе, а также в порах, трещинах, кавернах и пустотах. Изменение состава порового раствора под влиянием жизнедеятельности микроорганизмов заключается в том, что растворы насыщаются различными компонентами и приобретают свойства кислот, щелочей, солей различного состава [9]. Засоленные грунты могут быть различными по химическому составу накапливающихся в них солей. Засоление вызывается накоплением хлоридов, сульфатов или карбонатов, а в некоторых случаях – нитратов. В природе засоление носит большей частью смешанный характер (сульфатно-карбонатное, хлоридно-сульфатное и т.д.) [2]. При рассмотрении вопроса о механизме возникновения солонцов и насыщения поглощающего комплекса этих почв натрием большое значение придается процессу содообразования [1].

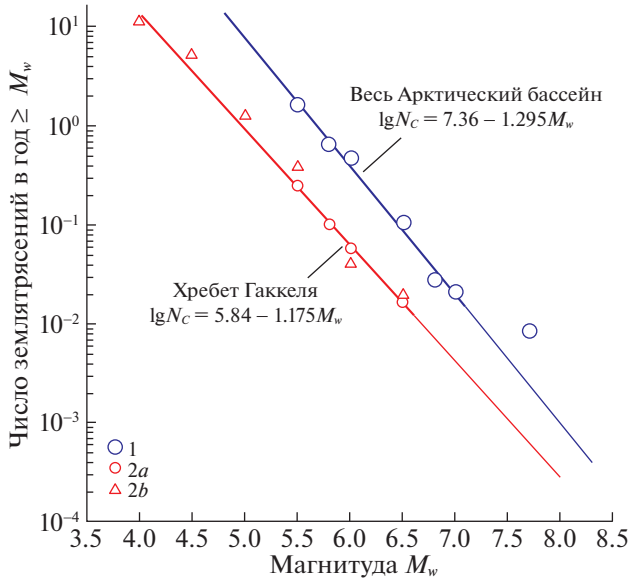


Рис. 2. Графики повторяемости землетрясений, зарегистрированных в пределах всего Арктического бассейна и подводного хребта Гаккеля [14].

Растения, согласно публикации [18], могут повлиять на возникновение засоления следующим образом. Для поддержания своей жизнедеятельности растениям необходимы азот и сера, которые интенсивно поглощаются из азотно- и серно-кислых солей. В результате высвобождаются катионы (в том числе Na^+), которые реагируют со свободной углекислотой и образуют карбонаты. Разложение органических остатков и круговорот минеральных элементов приводят к тому, что в ходе минерализации происходит образование солей, а выделение углекислоты при одновременном высвобождении щелочных и щелочноземельных элементов создает предпосылки для образования карбонатов, в том числе карбоната натрия.

Большая роль в содообразовании принадлежит сульфатредуцирующим бактериям. И.Н. Ан-

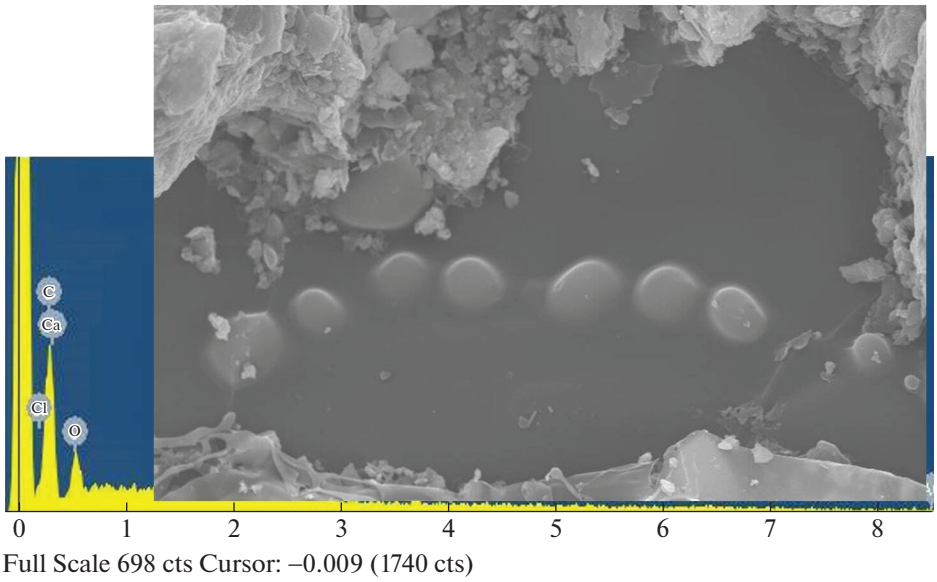


Рис. 3. Спектральный состав материала, окружающего предполагаемые клетки микроорганизмов в мерзлом неогеновом песке обнажения Мамонтова гора, Якутия. Кроме углерода, входящего в состав клеток, установлен кальций и хлор. Размер окруженных льдом клеток – несколько микрон (фото В.В. Рогова).

типов-Каратаев [1] придавал большое значение процессу сульфатредукции. В присутствии органического вещества Na_2SO_4, как известно, превращается в Na_2S. Сернистый натрий вступает в реакцию с имеющейся в почве углекислотой, и в результате этого образуются сода и сероводород: $Na_2S + CO_2 + H_2O = H_2S + Na_2CO_3$.

В качестве возможных путей щелочеобразования помимо восстановления сульфатов учитывается и процесс денитрификации. В последнем случае образование карбоната натрия протекает по предполагаемой схеме $2NaNO_3 \rightarrow 2NaNO_2 \rightarrow$ $\rightarrow Na_2CO_3 + N_2$ [2]. Соляные “рубашки” проф. В.В. Роговым были найдены вокруг микроорганизмов в мерзлых породах. Их происхождение пока неясно, но эти находки подтверждают связь засоления с деятельностью микроорганизмов (рис. 3).

Таким образом, содообразование следует рассматривать как биогенный процесс, обусловленный жизнедеятельностью разнообразных микроорганизмов и растений.

По мнению авторов, все три механизма могут наблюдаться в природных условиях. Возможно, что образование засоления для конкретного региона могло быть связано с действием какого-то одного из них или их совокупностью.

По данным [6] голоценовые повторно-жильные льды оз. Коолень на востоке Чукотского полуострова имеют минерализацию 35 мг/л, в составе анионов преобладает Cl^-, в составе катионов – Na^+. Авторы объясняют полученные значения минерализации и ионного состава импульверизацией. Однако под импульверизацией понимают явления перемещения солей через атмосферу в виде твердой пыли или с атмосферными осадками. Количество же хлора в атмосферных осадках в среднем измеряется величиной 2–3 мг на 1 л. Следовательно, под действием импульверизации не могла образоваться столь высокая минерализация повторно-жильных льдов. Озеро Коолень расположено на высоте 62 м над уровнем моря. Привлекая исследования [4, 15], можно сделать вывод, что засоление не было связано с действием морских трансгрессий голоцена в комплексе с вертикальными тектоническими движениями. Таким образом, возможное объяснение засоления повторно-жильных льдов на данной территории – это воздействие цунами.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕРЗЛЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ПОРОД В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Районирование территории Арктического побережья проводилось на основании данных, взятых из Атласа Арктики под ред. А.Ф. Трешникова [3] (геологическая карта, карта четвертичных отложений, среднегодовое количество осадков, схема распространения морских трансгрессий в плейстоцене), карты морских трансгрессий (по С.А. Стрелкову [20]), карты испаряемости (Атлас под ред. Л.Н. Колосовой) [13]. Также использовались схема распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов в Северном полушарии по

Рис. 4. Схема распространения засоленных мерзлых пород в Северном полушарии.

типам засоления (по А.В. Брушкову [5]), схема распространения мерзлых засоленных пород на полуострове Ямал [17] и схема распространения засоленных и незасоленных пород на полуостровах Ямал и Гыданский (Г.И. Дубикова и Н.В. Ивановой [11]).

Граница морского типа засоления выделена по максимальной бореальной трансгрессии микулинского межледниковья, согласно карте морских трансгрессий [20] – на территории России; карте морских трансгрессий в плейстоцене [3] – на зарубежных территориях. Выбор бореальной трансгрессии как южной границы распространения мерзлых засоленных пород обусловлен фактическими данными, собранными Г.И. Дубиковым и Н.В. Ивановой [10, 11] в России и E. Hivon [25] в Канаде, об их нахождении на территориях, которые попали под влияние этой трансгрессии.

Континентальный тип засоления был выделен при сопоставлении картосхемы атмосферных осадков и испаряемости путем выделения тех участков, где испарение преобладает над осадками.

На первом этапе работы по составлению схемы была создана база пространственных данных в программном пакете ArcGis. В качестве источников картографирования использовались растровые отсканированные изображения [5, 13, 20, 3],

пространственно согласованные: для полученных растровых изображений была проведена процедура пространственной привязки в единую географическую систему координат, азимутальную проекцию. Привязка проводилась по 11–15 опорным точкам методом полиномов 3-го порядка, что давало точность привязки 300–350 м, что соответствует допустимой погрешности 0.1–0.3 мм для масштаба 1 : 2500000. Путем сопоставления растровых данных на схеме были выделены контура, соответствующие морскому и континентальному типу засолений (рис. 4).

При сопоставлении со схемой распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов в Северном полушарии по типам засоления А.В. Брушкова [5], можно сделать вывод, что полученная схема в целом ее повторяет. Но есть и заметные различия. Если проводить границы распространения засоленных пород по максимальной морской трансгрессии четвертичного времени, то их необходимо провести также в северной части Кольского полуострова. В Западной Сибири, следуя направлению бореальной трансгрессии, следует сдвинуть границы распространения засоленных пород к югу (вниз по течению рек Обь и Таз, а также в районе р. Анабар). В Восточной Сибири границы практически идентичны, совпадая с максимальной трансгрессией. Распространение засоленных пород на островах Российской Арктики совпадает со схемой А.В. Брушкова, за исключением острова Новая Земля, на котором в соответствии с картой трансгрессий [20] засоленные породы должны располагаться практически повсеместно.

В зарубежной Арктике наблюдаются следующие несовпадения: в долине р. Маккензи континентальное засоление распространено на юг несколько меньше, а в северной части Гренландии (в областях, не занятых ледником) также должен формироваться континентальный тип засоления.

В северном полушарии, согласно составленной схеме, площадь территорий с морским типом засоления составляет 246 тыс. км^2 (246610.9), с континентальным – 4 млн км^2 (4301998).

ВЫВОДЫ

Наряду с известными способами формирования засоления в многолетнемерзлых породах представлены новые факты, которые могут объяснить образование засоления на значительных высотах над уровнем моря.

Впервые излагаются возможные гипотезы образования засоленных мерзлых пород на больших высотах над уровнем моря, объясняемые нагонными подъемами уровня моря и цунами в недавнем геологическом прошлом, новейшей тектоникой и биогенным засолением.

Примененный подход, учитывающий способы формирования засоления пород, позволил графически представить новый вариант схемы распространения мерзлых засоленных пород в Северном полушарии. Граница морского типа засоления установлена по максимальной бореальной трансгрессии, граница континентального типа засоления проведена при анализе и сопоставлении карты атмосферных осадков и испаряемости путем выделения тех участков, где испарение преобладает над осадками.

Показано значительное увеличение площадей с морским и континентальным типом засоления горных пород Арктического побережья Северного Ледовитого океана. Для высокогорных районов установлено, что уровень максимальной трансгрессии позднечетвертичного времени не доходил до таких высоких отметок, к тому же климат данных участков далек от континентального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов-Каратаев И.Н.* Мелиорация солонцов в СССР. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1953. 562 с.
2. *Аристовская Т.В.* Микробиология процессов почвообразования. Л.: Наука, 1980. 187 с.
3. Атлас Арктики / Под ред. А.Ф. Трешникова М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1985. 204 с.
4. *Баранская А.В.* Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий Российской Арктики: автореф. дис. ... канд. географ. наук. СПб., 2015. 26 с.
5. *Брушков А.В.* Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 332 с.
6. *Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Маслаков А.А., Васильчук А.К., Васильчук Ю.К.* Геохимический состав голоценовых повторно-жильных льдов северо-востока Чукотки // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 34–53.
7. *Велли Ю.Я., Карпунина А.А.* Засоленные вечномерзлые грунты как основания сооружений // Тр. 2 Междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск: Кн. изд-во, 1973. Вып. 7. С. 49–56.
8. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Цунами: предупреждение и защита. М.: МЧС России, 2006.
9. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова – 6-е изд., перераб. и дополн. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
10. *Дубиков Г.И.* Закономерности формирования состава и криогенного строения мерзлых осадочных пород (на примере Западной Сибири): дис. ... доктора геол.-мин. наук / Производ. и науч.-исслед. ин-т по инж. изысканиям в строительстве. М., 1984. 468 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01008690755

11. *Дубиков Г.И., Иванова Н.В.* Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 3–9.
12. *Каплин П.А., Селиванов А.О.* Изменения уровня морей России и развитие берегов: прошлое, настоящее, будущее. М.: ГЕОС, 1999. 299 с.
13. *Колосова Л.Н.* Географический атлас для учителей средней школы. М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1982.
14. *Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Яковенко О.И., Ковачев С.А.* К вопросу о цунамиопасности арктического региона // Арктика: экология и экономика. 2016. № 3 (23). С. 38–49.
15. *Макаров А.С.* Колебания уровня арктических морей в голоцене: автореф. дис. д-ра геогр. наук / С.-Петерб. гос. ун-т. СПб., 2017. 45 с.
16. *Панченко В.И., Аксенов В.И.* Физико-химический подход к классификации мерзлых грунтов по засоленности // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 70–73.
17. Проблемы строительства на засоленных мерзлых грунтах / Сб. научных трудов. М.: Изд-во “Эпоха”, 2007.
18. *Родин Л.Е., Базилевич Н.И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности Земного шара. М.: Наука, 1965. 264 с.
19. *Стрелецкая И.Д.* Закономерности пространственной изменчивости засоленных мерзлых пород и криопэгов на примере Бованенковского ГКМ: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 1991. 25 с.
20. *Стрелков С.А.* Развитие береговой линии Арктических морей СССР в четвертичном периоде. Морские берега / Тр. института геологии Академии наук Эстонской ССР. 1961. Т. VIII. С. 133–146.
21. *Хименков А.Н., Шешин Ю.Б.* Геокриологические условия побережья Карского моря в районе пос. Амдерма // Инженерная геология. 1992. № 2. С. 71–82.
22. *Azizul Moqsud M., Omine K.* Bioremediation of Agricultural Land Damaged by Tsunami, Biodegradation of Hazardous and Special Products, Rolando Chamy and Francisca Rosenkranz, IntechOpen, June 14th 2013. https://doi.org/10.5772/56595.
23. *Chernousenko G.I., Oreshnikova N.V., Ukraintseva N.G.* Soil Salinization in Coastal Areas of the Arctic and Pacific Regions of Russia // Eurasian Soil Science. 2001. V. 34. № 10.
24. *Geng X. et al.* Evidence of salt accumulation in beach intertidal zone due to evaporation // Sci. Rep. 6. 2016.
25. *Hivon E.* Behaviour of saline frozen soils. Edmonton, Alberta. 1991.
26. *Illangasekare T., Tyler S.W.* Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka // Water resources research. 2006. V. 42. W05201. https://doi.org/10.1029/2006WR004876
27. *Johnson R.G.* Salinity of interstitial water in a sandy beach // Limnology and oceanography. 1967. V. 12. 1.
28. *Paris R., Goto K., Goff J., Yanagisawa H.* Advances in the study of mega-tsunamis in the geological record. Earth-Science Reviews, Elsevier, 2020, 210. P.103381.

NEW APPROACH TO THE ELIMINATION OF BOUNDARIES OF SALINE FROZEN DEPOSITS OF THE ARCTIC COAST

Yu. V. Cherniak[a,#], A. A. Falaleeva[a,##], and A. V. Brouchkov[a,###]

[a] *Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

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

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

[###] *E-mail: brouchkov@hotmail.com*

Saline frozen rocks of the Arctic coast require detailed study, since these rocks are characterized by low bearing capacity and instability to technogenic impacts. Currently known methods of formation of salinity in permafrost due to the effects of marine transgression (marine salinity) and cryogenic concentration, as well as the concentration of salts due to dehydration of rocks (continental salinity), do not always make it possible to explain the presence of saline deposits on the Arctic coast of the Arctic Ocean. The purpose of this work is to present new mechanisms of salinity formation in permafrost that can explain the formation of salinization at significant altitudes above sea level. For the first time, possible hypotheses of the formation of saline frozen rocks at high altitudes above sea level are presented, due to the upsurge in sea level and tsunami in the recent geological past, the latest tectonics and biogenic salinization. The applied approach, taking into account the methods of salinization formation in rocks, allowed the authors to present graphically a new version of the map of the distribution of frozen saline rocks in the Northern Hemisphere. The boundary of the marine type of salinization was taken from the maximum boreal transgression, the boundary of the continental type of salinity was drawn by analyzing and comparing the map of atmospheric precipitation and the map of evaporation by isolating those areas where evaporation predominates over precipitation. A significant increase in the areas with marine and continental types of salinity in the Arctic coast of the Arctic Ocean is shown. For high-

altitude regions, it has been established that the level of the maximal transgression in Quaternary age did not reach such high marks, besides, the climate of these sites is far from the continental one.

Keywords: *salinity*, *permafrost*, *Arctic*, *tsunami*, *tectonics*, *microorganisms*, *marine transgression*

REFERENCES

1. Antipov-Karataev, I.N. *Melioratsiya solontsov v SSSR* [Reclamation of solonetses in the USSR]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1953, 562 p. (in Russian)
2. Aristovskaya, T.V. *Mikrobiologiya protsessov pochvoobrazovaniya* [Microbiology of soil formation processes]. Leningrad, Nauka Publ., 1980, 187 p. (in Russian).
3. *Atlas Arktiki* [Atlas of the Arctic]. Treshnikov, A.F., Ed. Moscow, Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1985, 204 p. (in Russian)
4. Baranskaya, A.V. *Rol' noveishikh vertikal'nykh tektonicheskikh dvizhenii v formirovanii rel'efa poberezhii Rossiiskoi Arktiki*. [The role of the latest vertical tectonic movements in the formation of the relief of the coasts of the Russian Arctic]. Extended Abstract Cand.Sci. (Geogr.) Diss.]. St. Petersburg, 2015, 26 p. (in Russian)
5. Brushkov, A.V. *Zasolennye merzlye porody Arkticheskogo poberezh'ya, ikh proiskhozhdenie i svoistva* [Saline frozen rocks of the Arctic coast, their origin and properties]. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1998, 332 p. (in Russian)
6. Budantseva, N.A., Vasil'chuk, D.Yu., Maslakov, A.A., Vasil'chuk, A.K., Vasil'chuk, Yu.K. *Geokhimicheskii sostav golotsenovykh povtorno-zhil'nykh l'dov severo-vostoka Chukotki* [Geochemical composition of Holocene ice wedges in northeastern Chukotka]. *Arktika i Antarktika*, 2017, no. 2, pp. 34–53. (in Russian)
7. Velli Yu.Ya., Karpunina A.A. *Zasolennye vechnomerzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Saline permafrost soils as foundations of engineering structures]. *Trudy 2 Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu* [Proc. 2nd Int. Conference on Permafrost]. Yakutsk, 1973, no. 7, pp. 49–56. (in Russian)
8. Vorob'ev, Yu.L. *Tsunami: preduprezhdenie i zashchita* [Tsunami: warning and protection]. Moscow, EMERCOM of Russia Publ., 2006. (in Russian)
9. *Gruntovedenie* [Soil and Rock Engineering]. Trofimov, V.T., Ed., Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2005, 1024 p. (in Russian)
10. Dubikov, G.I. *Zakonomernosti formirovaniya sostava i kriogennogo stroeniya merzlykh osadochnykh porod (na primere Zapadnoi Sibiri)* [Regularities of the formation of composition and cryogenic structure of frozen sedimentary rocks (by the example of Western Siberia)]. Doctoral (Geol.-Min.) dissertation, Moscow, PNIIIS Publ., 1984. (in Russian). URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01008690755. (in Russian)
11. Dubikov, G.I., Ivanova, N.V. *Zasolennye merzlye grunty i ikh rasprostranenie na territorii SSSR* [Saline frozen soils and their distribution by the USSR territory]. In: *Zasolennye merzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Saline frozen soils as foundations of structures]. Vyalov, S.S., Ed., Moscow, Nauka Publ., 1990. (in Russian)
12. Kaplin, P.A., Selivanov, A.O. *Izmeneniya urovnya morei Rossii i razvitie beregov: proshloe, nastoyashchee, budushchee* [Changes in the sea level in Russia and coastal development: past, present, and future]. Moscow, GEOS Publ., 1999, 299 p. (in Russian).
13. Kolosova, L.N. *Geograficheskii atlas dlya uchitelei srednei shkoly* [Geographic atlas for secondary school teachers]. Moscow, Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1982. (in Russian)
14. Kulikov, E.A., Ivashchenko, A.I., Medvedev, I.P., Yakovenko, O.I., Kovachev, S.A. *K voprosu o tsunamiopasnosti arkticheskogo regiona* [About tsunami hazard in the Arctic region]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2016, no. 3 (23), pp. 38–49. (in Russian)
15. Makarov, A.S. *Kolebaniya urovnya arkticheskikh morei v golotsene.* [Fluctuations in the level of the Arctic seas in the Holocene]. Extended abstract Doctoral (Geogr.) dissertation. St. Petersburg, SPBGU Publ., 2017, 45 p. (in Russian)
16. Panchenko, V.I., Aksenov, V.I. *Fiziko-khimicheskii podkhod k klassifikatsii merzlykh gruntov po zasolennosti* [Physicochemical approach to the classification of frozen soils by salinity]. *Zasolennye merzlye grunty kak osnovaniya sooruzhenii* [Saline frozen soils as foundations of engineering structures]. Vyalov, S.S., Ed., Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 70–73. (in Russian)
17. *Problemy stroitel'stva na zasolennykh merzlykh gruntakh* [Problems in construction on saline frozen soils]. Moscow, Epokha Publ., 2007. (in Russian)
18. Rodin, L.E., Bazilevich, N.I. *Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskii krugovorot zol'nykh elementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti Zemnogo shara* [Dynamics of organic matter and biological circulation of ash elements and nitrogen in the main types of the Earth vegetation]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 264 p. (in Russian)
19. Streletskaya, I.D. *Zakonomernosti prostranstvennoi izmenchivosti zasolennykh merzlykh porod i kriopegov na primere Bovanenkovskogo GKM* [Regularities of spatial variability of saline frozen rocks and cryopegs on the example of the Bovanenkovo gas condensate field]. Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) diss., Moscow, 1991, 25 p. (in Russian)
20. Strelkov, S.A. *Razvitie beregovoi linii Arkticheskikh morei SSSR v chetvertichnom periode* [Development of the coastline of the Arctic seas of the USSR in the Quaternary period]. *Trudy instituta geologii Akademii nauk Estonskoi SSR* [Proc. of the Institute of Geology of the Academy of Sciences of the Estonian SSR], 1961, no. VIII, pp. 133–146. (in Russian)

21. Khimenkov, A.N., Sheshin, Yu.B. *Geokriologicheskie usloviya poberezh'ya Karskogo morya v raione pos. Amderma* [Geocryological conditions of the Kara Sea coast near Amderma settlement]. *Inzhenernaya geologiya*, 1992, no. 2, pp. 71–82. (in Russian)

22. Azizul Moqsud, M., Omine, K. Bioremediation of Agricultural Land Damaged by Tsunami, Biodegradation of Hazardous and Special Products, Rolando Chamy and Francisca Rosenkranz, IntechOpen, June 14th 2013. DOI: 10.5772/56595.

23. Chernousenko, G.I., Oreshnikova, N.V., Ukraintseva, N.G. Soil Salinization in Coastal Areas of the Arctic and Pacific Regions of Russia // *Eurasian Soil Science*. 2001. V. 34. No. 10.

24. Geng, X. et al. Evidence of salt accumulation in beach intertidal zone due to evaporation // *Sci. Rep*., 6. 2016.

25. Hivon, E. Behaviour of saline frozen soils. Edmonton, Alberta. 1991.

26. Illangasekare, T., Tyler, S.W. Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka // *Water resources research*. 2006, vol., 42, W05201, doi:10.1029/2006WR0,04876.

27. Johnson, R.G. Salinity of interstitial water in a sandy beach // *Limnology and oceanography*. 1967, vol. 12, no. 1, pp. 1–7.

28. Paris, R., Goto, K., Goff, J., Yanagisawa, H. Advances in the study of mega-tsunamis in the geological record. Earth-Science Reviews, Elsevier, 2020, 210, pp. 103381.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 45–59

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 504;502.64

ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ В ГОРОДЕ: ФОРМИРОВАНИЕ, ДИНАМИКА, ВОЗДЕЙСТВИЕ

© 2021 г. В. Г. Заиканов[1,*], Т. Б. Минакова[1], Е. В. Булдакова[1]

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

**E-mail: v.zaikanov@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.
После доработки 28.05.2021 г.
Принята к публикации 24.06.2021 г.

Проблемы городов, в том числе экологические, прямо пропорциональны их росту. В настоящее время в городах сконцентрированы опасные производственные объекты и 75% населения страны. В статье дается характеристика возможных опасных техногенных факторов и установление их связей с природными опасностями. При тесном взаимодействии природных и техногенных факторов в городе формируются новые природно-техногенные опасности, которые объединены в семь групп; рассматривается принцип их образования. Для разрешения противоречия между интенсивной застройкой, приводящей к снижению устойчивости геологической среды, и сохранением экологической безопасности города требуются обоснование, выделение и обязательный учет природно-техногенных геоэкологических опасностей в нормативных документах.

Ключевые слова: *опасные природные процессы*, *техногенные факторы*, *опасные производственные объекты*, *природно-техногенные опасности*, *экономический ущерб*

DOI: 10.31857/S086978092105009X

ВВЕДЕНИЕ

Площади городов в мире, в том числе и в России, год от года расширяются и в настоящее время составляют менее 2% от площади суши. За последние десять лет по данным Росреестра площадь городов в Российской Федерации увеличилась на 400 тыс. га и превысила 8 млн га. Вместе с площадями городов пропорционально увеличиваются экологические проблемы в них. Большая часть мирового экологического неблагополучия связана именно с процессом урбанизации. Поэтому экологичность города – интенсивность использования природных ресурсов и создаваемой нагрузки на окружающую среду, является важным фактором в оценке их безопасности.

Обычно при оценке экологического состояния города согласно ст. 4 ФЗ № 7[1] учитывается загрязнение окружающей среды выбросами и сбросами загрязняющих веществ (ЗВ), образованием и накоплением твердых коммунальных отходов (ТКО). Их опасность оценивается в соответствии с категориями негативного воздействия на окружающую среду (см. ФЗ № 219[2] с последующим уточнением, Постановление Правительства РФ № 2398[3]). Приоритетным показателем экологической оценки до сих пор остаются выбросы ЗВ в атмосферный воздух. Об этом свидетельствует соотношение показателей объемов затрат (6 : 1) на охрану атмосферного воздуха, защиту и реабилитацию компонентов геологической среды, а также объемов инвестиционных затрат в основной капитал (4 : 1), направляемых на охрану окружающей среды [2]. Однако в соответствии с введением новых критериев постановки на учет опасных производственных объектов (ОПО) с 2021 г. любой из них, даже не имеющий источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, должен считаться объектом негативного воздействия на окружающую среду (НВОС). Поэтому возникает необходимость уточнения перечня источников НВОС и их ранжирования.

[1] Федеральный закон "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 № 7-ФЗ (последняя редакция). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/

[2] Федеральный закон о внесении изменений в ФЗ "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями на 26 июля 2019 года) от 21.07.2014 № 219-ФЗ.

[3] Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2398 "Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий". URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_373399

Взаимодействие природных и техногенных факторов происходит в основном в пределах геологической среды (ГС), поэтому она выступает в качестве объекта исследований, а критерием оценки геоэкологической безопасности города является ее устойчивость. ГС максимально изменяется при строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов, а также в результате загрязнения и других видов негативного воздействия на нее. Вследствие этого среди экологических факторов целесообразно выделять *самостоятельную геоэкологическую группу*.

Термин – "геологическая среда", широко используется и неоднозначно трактуется разными учеными. В.Т. Трофимов и В.А. Королев [16], придавая ноосферный смысл определению, считают, что ГС – область верхних горизонтов литосферы, находящаяся в прошлом, настоящем и будущем во взаимодействии с инженерно-хозяйственной деятельностью человека, качественно и количественно эволюционирующая во времени и являющаяся компонентом природных и природно-технических экосистем и возможным элементом геноогенеза. Поскольку объектом настоящего исследования является ГС города, нам ближе термин, предложенный Е.М. Сергеевым: "*Геологическая среда – верхняя часть литосферы, рассматриваемая как многокомпонентная система, находящаяся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, в результате чего происходит изменение природных геологических процессов и возникновение новых антропогенных явлений...*" [15]. В данном случае термин связывается с техногенной деятельностью человека, которая направлена, с одной стороны, на разрушение природной геологической среды, а с другой – на ее преобразование в результате строительства новых хозяйственных объектов.

В наших исследованиях геоэкологическая безопасность города понимается как отсутствие или минимальное (допустимое) воздействие опасных природно-техногенных факторов на человека, компоненты природы и объекты экономики. На основе этого определения геологическая среда выполняет три функции и рассматривается как:

– вмещающая среда для горных работ, подземных хранилищ, объектов городского хозяйства (подземные коммуникации, основания зданий и сооружений и др.);

– реципиент относительно техногенного воздействия со стороны ОПО, застроенных территорий, внешних отвалов, полигонов промышленных и коммунальных отходов;

– источник негативного воздействия на объекты экономики и коммуникации, вследствие агрессивных физико-химических свойств грунтов и подземных вод, на растительность и почвы, загрязненные радиоактивными и токсичными веществами, и опосредованно на человека.

Таким образом, в экологической безопасности городской среды геологическая среда играет огромную роль.

Для выявления природно-техногенных опасностей необходимо проанализировать опасные природные и техногенные факторы и особенности их взаимодействия.

Природно-техногенная геоэкологическая опасность – результат взаимодействия опасных природных и техногенных процессов и факторов, представляющий угрозу для человека, компонентов природы (в том числе ГС) и объектов экономики. Воздействие природных и техногенных факторов на изменение состояния ГС будет различным, а конечные результаты могут быть одинаковыми. Система связей весьма сложная: существуют связи прямые (первого уровня), косвенные (многоуровневые) и обратные (замкнутые цепочки).

Воздействию природных факторов на устойчивость ГС городов уделялось достаточное внимание многими авторами (Бурова В.Н., Козлякова И.В., Котлов Ф.В., Кофф Г.Л., Кутепов В.М., Осипов В.И., Рагозин А.Л., Сергеев Е.М., Трофимов В.Т. и др.). Оценкой геоэкологической безопасности на протяжении двух последних десятилетий активно занимались авторы настоящей статьи. Так, было оценено проявление природных опасностей в городах России [13]. К неблагоприятным природным факторам, усложняющим условия строительства и эксплуатации промышленных и жилищных объектов, относятся подтопление, а также наличие слабых, обводненных и органоминеральных грунтов, эрозионные и др. процессы, учтенные при геоэкологической оценке городов России.

Цель настоящего исследования – установление особенностей формирования природно-техногенных опасностей, как результата взаимодействия природных и техногенных факторов на городской территории.

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

В городах, где сосредоточены ОПО, преобладают опасные техногенные факторы. Считается, что соотношение числа техногенных событий к природным процессам составляет примерно 3.5: 1[4]. Это подтверждается и расчетами авторов [5, 6].

Поэтому первостепенной задачей было определение характерных для города источников возможного техногенного прямого (например, разлив нефтепродуктов, стоки недоочищенных вод,

[4] Статистика чрезвычайных ситуаций. URL: https://vuzlit.ru/141288/statistika_chrezvychaynyh_situatsiy

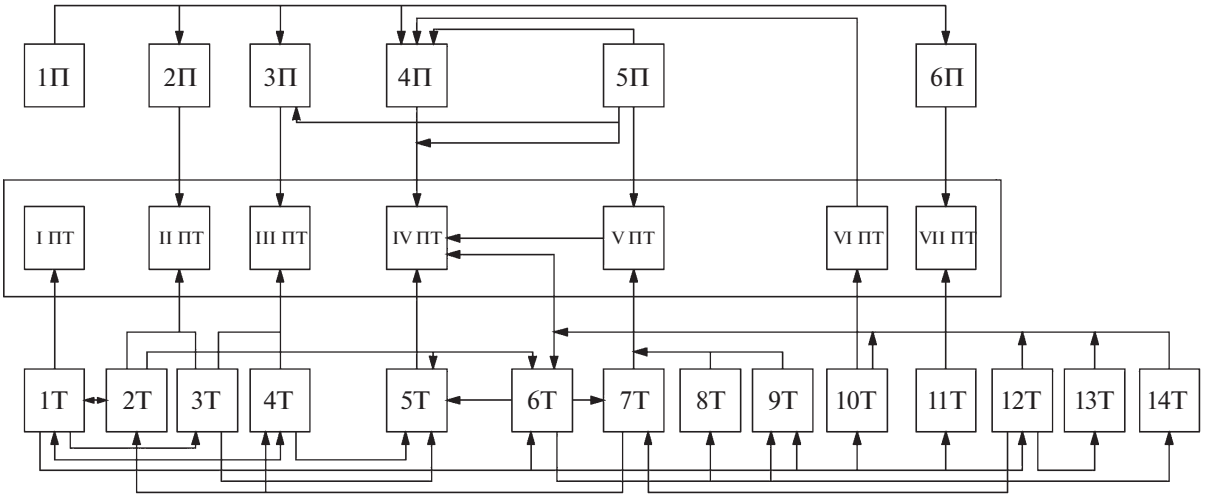


Рис. 1. Схема структуры формирования и взаимодействия возможных природно-техногенных геоэкологических опасностей на городской территории (пояснения в тексте).

накопление промышленных отходов) или косвенного (загрязнение почв токсикантами промышленного происхождения при выбросах в атмосферный воздух, деформация земной поверхности, различные последствия аварий) негативного воздействия на ГС. Кроме постоянного воздействия, внезапно могут случаться пожары, взрывы, аварии на транспортных и энергетических системах, коммунальных системах жизнеобеспечения, очистных сооружениях и т.д.

Вторая задача заключалась в анализе возможных взаимосвязей техногенных факторов с природными опасностями и ГС. Первоначально устанавливались связи первого порядка, но поскольку возникали сложные цепочки взаимозависимостей, рассматривались связи и других порядков.

Взаимодействие природных и техногенных факторов может привести к возникновению комплексной природно-техногенной опасности, т.е. ситуации, когда даже относительно слабое природное воздействие вызывает серьезную техногенную аварию (деформация грунта и разрывы нефтепровода) и, наоборот, постоянные утечки из водонесущих коммуникаций способствуют расширению подтопленных территорий (рис. 1).

На представленной схеме индексами обозначены:

– **природные опасности**: 1П – землетрясения; 2П – суффозионно-карстовые процессы; 3П – оползневые процессы; 4П – слабые грунты; 5П – высокий УПВ; 6П – радиоактивность, радоноопасность.

– **техногенные опасности**: 1Т – техногенные землетрясения, 2Т – подземные горные выработки; 3Т – подземное строительство; 4Т – открытые горные разработки; 5Т – техногенные грунты; 6Т – высокоплотная застройка; 7Т – откачка воды; 8Т – утечки из водонесущих коммуникаций; 9Т – аварии на водонесущих коммуникациях; 10Т – аварии на гидротехнических сооружениях (ГТС); 11Т – последствия аварии на АЭС и других подобных объектах; 12Т – промпредприятия, аварии на них и скважинах, трубопроводах; 13Т – промышленные отходы; 14Т – объекты складирования или захоронения ТКО.

– **группы природно-техногенных опасностей**: I ПТ – техногенно-сейсмическая; II ПТ техногенно-провально-просадочная; III ПТ – техногенно-гравитационная; IV ПТ – техногенно-грунтовая; V ПТ – техногенно-гидрогеологическая; VI ПТ – аварийно-гидрологическая; VII ПТ – радиационно-радоновая.

На схеме верхний блок представлен некоторыми, наиболее часто встречающимися в городах, природными опасностями, нижний – основными техногенными опасностями, а средний блок – потенциальными природно-техногенными опасностями, формирующимися при их взаимодействии. Схема является обобщающей, отражающей возможные связи и зависимости. Некоторые дополнительные связи анализируются более подробно ниже. При этом природные и техногенные опасности рассматриваются только с позиций оценки их возможной трансформации в природно-техногенные опасности.

Для каждого города характерен определенный набор природно-техногенных опасностей. Основной критерий их выявления – соотношение природных и техногенных признаков, к числу которых относятся: вид источника опасности (природные процессы или техногенные объекты),

причина проявления (что может стать толчком), возможные последствия.

Природное землетрясение (1П) может приводить к серьезному нарушению земной поверхности на большой площади, разрушению объектов экономики, но в настоящей статье эта природная опасность не рассматривается. Однако и человек может спровоцировать землетрясение (1Т), например, подземными ядерными испытаниями. Значительный сейсмический эффект вызывают подземные горные работы, мощные взрывы в карьерах и др. Особенно опасны техногенные землетрясения на сейсмоопасных территориях. Известны также техногенные землетрясения, вызванные нагнетанием жидкости под напором в глубокие скважины. Причиной землетрясения может послужить и непосредственно извлечение нефти и газа. Техногенные землетрясения могут проявляться при заполнении крупных водохранилищ.

Последствиями природно-техногенных землетрясений (I ПТ) первого уровня могут быть не только нарушение земной поверхности – трещины, провалы, но и активизация экзогенных геологических процессов (ЭГП) – 2П и 3П, обвалы в шахтах (2Т) и на карьерах (4Т), подвижка грунтовых масс (4П, 5Т), а как следствие, на следующих уровнях взаимодействия – деформация и разрушение зданий и сооружений (6Т, 9Т, 10Т), аварии на ОПО (12Т), радиационное и геохимическое загрязнение территории (11Т, 12Т) и т.д.

Вмешательство человека в естественный ход развития ЭГП может вызвать их активизацию и привести к необратимым последствиям. Суффозионно-карстовые провалы и оседания земной поверхности (2П) возникают на территориях многих городов (Москва, Дзержинск, Казань и др.) при наличии карстующихся пород, растворяющей способности подземных или фильтрующихся с поверхности вод, а также соответствующей гидродинамической обстановки (7Т, 8Т и 9Т) и др.

Города, в границах которых или вблизи которых есть горнодобывающие предприятия, испытывают разнообразное прямое и косвенное техногенное воздействие. При подземной добыче полезных ископаемых (2Т) образуются пустоты, провалы и мульды оседания. Например, бóльшая часть жилой застройки г. Березники расположена над шахтами ПАО “Уралкалий”, ведущего разработки Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. На некоторых участках пустóты расположены в 250–300 м от поверхности. Например, в 2007 г. на территории рудника в районе фабрики технической соли произошел провал. Воронка образовалась в месте прорыва грунтовых вод в рудник. Позднее было выделено шесть потенциально опасных зон территории г. Березники[5].

Эксплуатация шахт сопровождается техногенными опасностями: взрывами метана, изъятием пустой породы (5Т), формированием терриконов и т.д. Над закрытыми подземными разработками полезных ископаемых возникают провалы, прогибы поверхности. Например, в Кузбассе подземные выработки тянутся на многие километры, и здесь ежегодно в среднем образуются до 50 провалов.

Мощным фактором воздействия на ГС является подземное строительство (3Т). Оно вызывает изменение напряженно-деформированного состояния горных пород, возникновение различных деформаций, образование мульд оседания (например, вдоль трасс метрополитена). Часто такое строительство ведется при интенсивном водоотливе (7Т) от возводимых сооружений, вызывающем снижение гидростатических напоров и статических уровней горизонтов подземных вод. Подземное строительство сопряжено с изъятием и перемещением огромных объемов земляных масс (5Т) и сопровождается необходимостью их складирования на земной поверхности.

Таким образом, процесс образования пустот в недрах, а также воронок, провалов, мульд оседания на поверхности относится к числу природно-техногенных опасностей (II ПТ), тесно связанных с образованием техногенных грунтов (5Т), изменением режима подземных вод (7Т). Несущие конструкции зданий, построенных на подрабатываемых территориях без осуществления защитных мероприятий, под воздействием смещений земной поверхности деформируются, возникают повреждения в виде трещин, перекосов и т.д.

Действующий карьер по добыче полезных ископаемых (4Т) – техногенный объект, возникновение которого обусловлено запросом экономики. Его деятельность сопряжена с возможностью провоцирования техногенного землетрясения (I ПТ) (пример обратной связи), с образованием техногенных грунтов (5Т), порой с необходимостью откачки воды (7Т). Согласно некоторым наблюдениям часто площадь территории с проявлением влияния горных разработок превышает в 10 и более раз площадь собственно горных работ. В Старооскольском-Губкинском промышленном районе в результате работы дренажных систем Лебединского и Стойленского карьеров, шахты им. Губкина, функционирования водозаборов подземных вод для водоснабжения близлежащих городов, хвостохранилищ и Старооскольского водохранилища площадь депрессионной ворон-

[5] URL: https://nashural.ru/mesta/permskij-kraj/provaly-v-bereznikah-i-solikamske/https://fb.ru/article/355738/provalyi-v-bereznikah-opisanie-istoriya-i-posledstviya

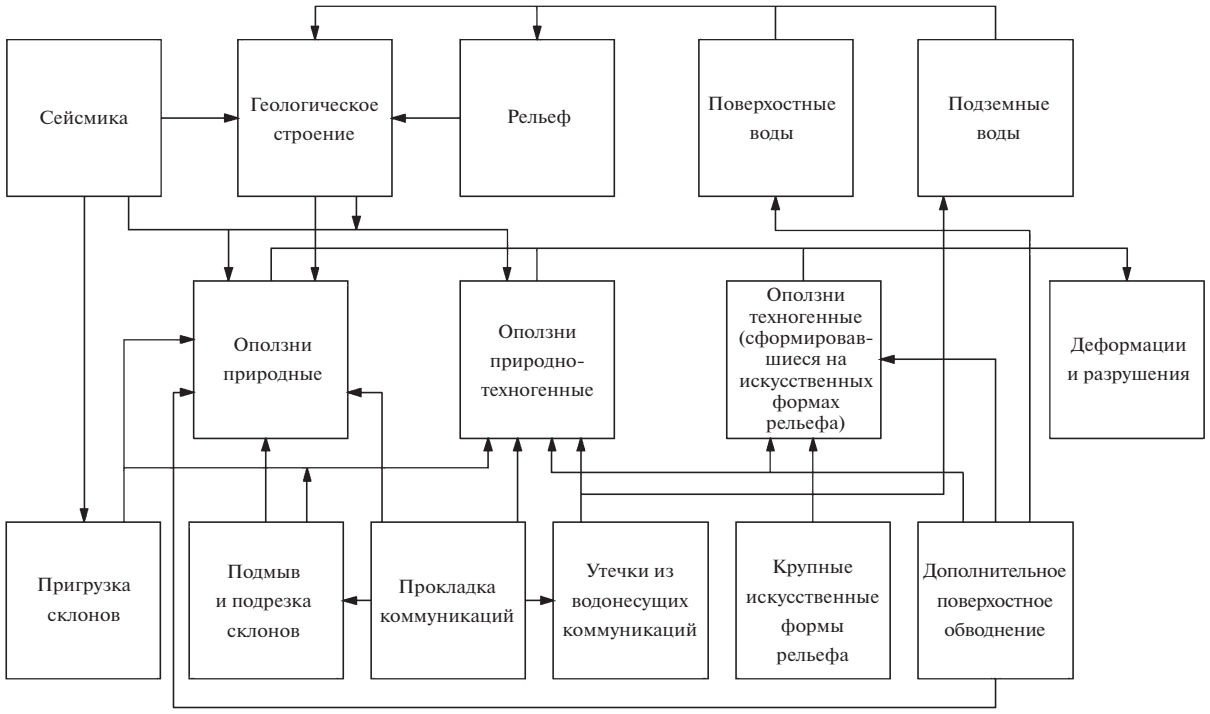


Рис. 2. Формирование природных, природно-техногенных, техногенных оползней.

ки составила 300 км^2 [14]. Закрытый карьер – это отрицательная форма техногенного рельефа, порой неподлежащая рекультивации, подверженная развитию эрозии и оползней (3П).

Подземное строительство, добыча и переработка полезных ископаемых связаны с необходимостью складирования большого количества пустой породы (5Т) и отходов обогащения (13Т), а также формированием техногенного рельефа и нарушением гидрогеологического режима (7Т).

Другой опасный процесс – оползневой (3П). Оползни могут быть природными, природно-техногенными и техногенными (рис. 2).

Сход оползня может провоцироваться природными причинами (обильные осадки, снеготаяние и др.) либо деятельностью человека, например, подрезка склона при строительстве, техногенное землетрясение (1Т). Во втором случае это природно-техногенная опасность. Техногенный оползень может возникнуть на таких объектах, как борт карьера (4Т), насыпной склон горнолыжной трассы или полигона складирования ТКО (14Т) и т.д. Например, исследования, проводимые на территории КМА, показали, что на склонах отвалов развиваются активные оползневые и эрозионные процессы, которые препятствуют их естественному зарастанию. В городах преобладают оползни природно-техногенного характера.

В городе может происходить смещение грунтов под действием гравитации при природно-техногенных оползнях (3П), а чаще – искусственное перемещение грунтовых масс (III ПТ) при строительстве (3Т) и горнодобывающей деятельности (2Т и 4Т).

После возведения здания или сооружения состояние грунтов основания значительно изменяется в результате перераспределения начального напряженного состояния, нарушения естественного теплового режима и условий аэрации, изменения гидрогеологического режима. На участках промышленных предприятий и жилых массивов в зону аэрации могут поступать сточные и загрязненные воды, воды утечек. Агрессивность среды и изменение физико-механических свойств грунтов приводит со временем к деформации фундаментов и строительных конструкций за счет неравномерных осадок, набухания и др. Переувлажнение грунтов при подтоплении (5П) и затоплении территории в результате прорыва плотины (VI ПТ) также снижает их несущую способность. Под длительным действием статических нагрузок плотной застройки могут изменяться структура и некоторые свойства грунтов естественных оснований технических сооружений. При разработке котлована вблизи фундаментов существующих зданий вследствие снижения напряжения в массиве грунта ниже дна котлована и рядом с ним уменьшается несущая способность их оснований [10]. В местах прокладки труб теплоцентралей нарушается тепло-

вой режим грунтов, формируется поле блуждающих токов.

Наличие слабых природных (4П) и техногенных грунтов (5Т), характерное для многих городов, представляет определенную угрозу для технических объектов – их деформации и разрушению. Одним из примеров является "врастание" жилых зданий в землю в результате большой осадки поверхности со слабыми или переувлажненными грунтами [9].

Таким образом, преобладание в городе техногенных и наличие слабых грунтов создает определенную опасность для объектов экономики (6Т и 12Т) – формируется IV ПТ природно-техногенная опасность.

Активное строительство в городах, сопровождается нарушением земель, их доля в общей сумме нарушаемых площадей составляет 17%. В местах приложения чрезвычайной статической нагрузки происходит оседание поверхности, особенно при искусственном водопонижении (7Т). В результате вибрации при движении транспорта, действия строительных механизмов, взрывов на грунты передаются дополнительные динамические нагрузки. Оседание поверхности возможно на разуплотненных грунтах (IV ПТ). Причинами оседания также являются: подземное строительство (3Т), водозаборы (7Т) и др.

В крупных городах доля запечатанных территорий на отдельных участках может составлять 80% [11]. Покрытие поверхности непроницаемыми асфальтобетонными материалами, застройка территорий – причины деградации городских почв и повышения нагрузки на ливневую канализацию. Запечатанные почвы и грунты имеют измененный воздушный, водный и тепловой режимы, что представляет угрозу биоразнообразию, способствует повышению температуры в городе.

Гидрогеологические условия городских пространств характеризуются нарушением естественного водного баланса, с одной стороны – интенсивная эксплуатация подземных вод, а с другой – питание грунтовых вод за счет утечек из подземных коммуникаций (8Т и 9Т), инфильтрации поливных вод, сброса сточных вод. Для многих городов характерен процесс повышения уровня подземных вод (УПВ), вплоть до подтопления жилых зданий и промышленных объектов. При прокладке подземных коммуникаций в условиях подтопления повышается агрессивность вод и грунтов, которая сопровождается коррозией труб и, следовательно, новыми утечками (пример обратной связи). В результате повышается УПВ и расширяются площади подтопления.

Подтопление (V ПТ) – природно-техногенный процесс широко распространен на городских территориях. При строительстве и эксплуатации инженерных сооружений нарушается режим и условия питания и дренирования грунтовых вод, баланс инфильтрации и испарения. Этот процесс играет существенную роль в активизации ЭГП, увлажнении грунтов и, в итоге, в снижении устойчивости ГС.

В России насчитывается более 25 тыс. опасных гидротехнических объектов. Причиной их разрушения могут быть землетрясения, размывы дамб паводками, оползни и др., а также и техногенные факторы. Прорывы сопровождаются затоплением обширных территорий и значительным ущербом [5]. Это – природно-техногенная опасность VI ПТ.

В городах существует природная (6П) и техногенная (11Т) радиационная опасность. Сочетание их источников на одной территории представляет природно-техногенную опасность (VII ПТ). В стране более 700 крупных радиационно-опасных объектов и около 7.3 тыс. организаций, осуществляющих свою деятельность с использованием радиоактивных веществ. Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников (6П), составляет около 0.35 мкЗв/год. Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около 15 мкЗв/год. Наибольший вклад в дозу вносит радон. Основным источником этого радиоактивного инертного газа является земная кора. В природную среду поступают в больших количествах естественные радионуклиды, извлекаемые из недр и содержащиеся в фосфорных удобрениях, продуктах сжигания газа и угля. Техногенный источник радона в помещении – строительные материалы (бетон, кирпич, пемза, гранит и др.), содержащие естественные радионуклиды. Источниками облучения являются атомные электростанции (АЭС). При неправильной эксплуатации АЭС могут выделяться радиоактивные вещества, угрожающие окружающей среде. В таких случаях последствия могут распространяться далеко за пределы 30-километровой СЗЗ. Так, в результате аварии на Чернобыльской АЭС загрязнению подверглось более 200 тыс. км^2. Особую угрозу создают объекты хранения и переработки отработавшего ядерного топлива.

Загрязненные радионуклидами территории имелись на 18 предприятиях отрасли. Общая площадь загрязненных территорий составляла более 112 км^2 [2]. Однако оценка в 2018 г. показала, что отношение фактических показателей к годовым предельно допустимым выбросам (ПДВ), рассчитанным и утвержденным для каждой АЭС, было значительно ниже и находилось на уровне не выше 2–3% от ПДВ. Фактические значения активностей жидких сбросов в окружающую среду и поступление радионуклидов в поверхностные воды по отношению к допустимому сбросу (ДС),

рассчитанному и утвержденному для каждой АЭС, были меньше допустимых и не превышали 1.5% величины ДС.

Рассмотренная схема (см. рис. 1) с выделением семи групп природно-техногенных опасностей отражает принцип их формирования. Некоторые природные и техногенные факторы принимают участие в нескольких группах природно-техногенных опасностей. Конечно, здесь представлены далеко не все возможные варианты формирования других видов опасностей.

Так, для большинства городских территорий будет характерно геохимическое загрязнение таких компонентов ГС, как почвы, грунты, подземные воды. В городах сосредоточены основные источники геохимического загрязнения природных сред: промышленные, транспортные, энергетические, коммунально-бытовые и т.д., и одновременно здесь концентрируется население – основной реципиент неудовлетворительного состояния окружающей среды. В результате производственной деятельности (12Т) происходит загрязнение почв и грунтов химическими токсикантами, нефтью, нефтепродуктами и др.

Одним из источников загрязнения почв, подземных и поверхностных вод являются выбросы в атмосферу, распространяемые на большие расстояния. В последнее десятилетие ведутся наблюдения за загрязнением почв тяжелыми металлами на 1.5% городских земель, где размещаются предприятия металлургические, энергетики, машиностроения и металлообработки и т.д. Особенно сильно загрязнены тяжелыми металлами (ТМ) почвы километровой зоны вокруг крупного источника промышленных выбросов в атмосферный воздух. Однако радиус их распространения может достигать нескольких километров [2, 3]. В крупных промышленных городах происходит наложение загрязнения от отдельных техногенных источников, и тогда общая площадь негативного воздействия может быть близкой к городской площади или превосходить ее. Таким образом, результаты техногенных выбросов на втором уровне отражаются на изменении состояния компонентов ГС – почв, горных пород и вод.

В соответствии с действующим природоохранным законодательством РФ функции по контролю и надзору в сфере природопользования и области охраны окружающей среды возложены на федеральный орган исполнительной власти – Росприроднадзор, а – экологического контроля в строительстве на Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору – Ростехнадзор. В целях получения достоверной информации об объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, организован государственный учет таких объектов. На конец 2018 г. в государственном реестре было зарегистрировано более 170 тыс. ОПО. Из них преобладающее большинство составляют объекты III класса опасности (52.6%), а также IV класса опасности (41.7%). К ОПО II класса опасности относятся 4.5%, а к I классу опасности – около 2 тыс. объектов (1.15% от общего числа).

Для различных видов экономической деятельности характерны особые сочетания преобладающих видов загрязняющих веществ и разной степени опасности. Согласно классификации промышленности по экологической опасности [17] к особенно опасным относятся предприятия цветной металлургии и микробиологии. В группу очень опасных вошли предприятия химической, нефтехимической, черной металлургии и теплоэнергетики, в группу опасных – деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной. Радиус их воздействия может существенно меняться в зависимости от мощности предприятия. Например, при росте производительности металлургического комбината в 3.5 раза, радиус воздействия может увеличиться в 4.5 раза [3]. Предприятия отрасли цветной металлургии отличаются наибольшим выходом промышленных отходов на единицу продукции. Сбросы сточных вод характеризуются сложным полиэлементным содержанием вследствие применяемых технологий. Последствием производства черных металлов является формирование геохимических аномалий в природных средах, нарушение земель, в том числе отвалы золы, шлаков и шламов. На геологическую среду оказывает воздействие тепло, выделяемое объектами теплоэнергетики и металлургии, что приводит к изменению водно-физических свойств грунтов.

Об объемах воздействия на ГС можно судить на примере двух видов экономической деятельности угле- и нефтедобычи. На их долю от общего по стране валового выброса в атмосферный воздух вредных веществ стационарными источниками приходилось в 2018 г. – 31%, а отходов – около 70%. Площадь нарушенных земель на конец 2018 г. – 619.7 тыс. га, что составило 78% от всей нарушенной площади в РФ [2].

Часто различные производственные объекты города, прямо или косвенно взаимодействуя между собой, образуют единую систему организации хозяйственного управления на базе общих ресурсных циклов. На одной промплощадке могут быть размещены объекты, дополняющие друг друга или ограничивающие возможности функционирования соседа.

В качестве примера можно привести г. Череповец Вологодской обл., в котором расположены один из крупнейших в России металлургический комбинат ПАО “Северсталь”, ОАО “Северсталь-Метиз” и АО “Апатит”, занимающие первые ме-

ста в стране по производству соответственно метизов и фосфатных удобрений. На долю черной металлургии приходится 85% и химической промышленности 10% валового продукта города. Эти предприятия размещаются на одной промплощадке, площадь которой около ½ площади самого города и примыкает к его селитебной зоне с юго-востока[6].

Через атмосферные выбросы происходит до 70% оседания токсичных веществ. При этом загрязнены не только территории промплощадок, но и почвы близлежащих селитебных зон. Промышленные отходы, в том числе и токсичные, складируются в шламонакопителях и отвалах на территориях предприятий и города. На АО "Аммофос" отходы производства серной кислоты – пиритный огарок, и отходы производства фосфорной кислоты – фосфогипс, удаляются гидротранспортом в шламонакопитель.

Некоторые предприятия Череповца сбрасывают свои сточные воды непосредственно в ливневую канализацию, не имеющую очистных сооружений, с последующим направлением их в водные объекты города. Поэтому, в частности по данным 2019 г., качество воды Рыбинского водохранилища по показателю индекса загрязнения воды (УКИЗВ) в пунктах наблюдений выше и ниже Череповца, а также воды р. Кошта в городе относятся к категории 4А "грязная" [7].

Размещение на одной площадке производств разного профиля грозит возникновением цепной реакции событий при техногенной аварии на одном из них (12Т). Увеличение числа синергетических опасных явлений, когда одно событие порождает другое, влечет за собой большие негативные последствия.

Один из объективных показателей, отражающий состояние промышленной безопасности ОПО, – аварийность, в большинстве случаев приводящая к негативным последствиям не только для технических устройств и зданий, но и для человека, и для компонентов природы. Для определения потенциальной геоэкологической опасности необходимо установить наиболее характерные для городов виды аварий, вероятность их возникновения и размеры возможных последствий. Частота, виды и сложность промышленных аварий зависят от специфики экономической деятельности отраслей.

В результате анализа данных годовых отчетов о деятельности Ростехнадзора за несколько лет (2016–2019 гг.)[7] были получены результаты распределения ОПО по различным видам экономической деятельности и их аварийности (рис. 3).

Среднегодовое число аварий по видам экономической деятельности изменяется от 1 до нескольких десятков в год. При этом отмечается общая тенденция для данных видов экономической деятельности снижение числа аварий к 2019 г. Максимальное среднегодовое количество аварий характерно для отрасли газораспределения и газопотребления с самым многочисленным числом ОПО. Такие аварии встречаются, как правило, в населенных пунктах, но их воздействие по сравнению с другими ОПО относительно незначительное. Причинами частого выброса газа на внутригородских сетях является механическое повреждение трубопроводов при производстве земляных и ремонтных работ, работе транспорта и т.п. Минимальным числом аварий отличились ОПО химической отрасли и оборонно-промышленного комплекса (ОПК). На таких объектах, по-видимому, осуществляется особенно строгий экологический контроль.

В РФ 148 городов (с численностью более 100 тыс. человек) расположены в зонах повышенной химической опасности. Наибольшее число аварий происходит на предприятиях, производящих, хранящих и транспортирующих хлор, аммиак, ацетилен, минеральные удобрения, гербициды, продукты органического и неорганического синтеза. К числу высоконагруженных производствами химического профиля относятся города: Дзержинск, Новочебоксарск, Кирово-Чепецк, Березники и др. Аварии на металлургических заводах в городах Челябинск, Серов, Новый Оскол, Череповец, Нижний Тагил были связаны в основном с нарушением технологических процессов.

В городах высокая плотность газораспределительной сети низкого давления и объектов использования нефтепродуктов (АГС, АЗС, заводы нефтепереработки и др.). Для ОПО по переработке нефтехимического сырья характерны взрывы с последующим возгоранием, что приводит к разрушению оборудования и даже зданий, но в пределах территории самих предприятий. Однако при разрушениях образуются дополнительные отходы и, следовательно, возрастают объемы их складирования, что оказывает негативное воздействие на природные компоненты.

Преобладающие виды аварий – выбросы опасных веществ, включая газ; разливы нефтепродуктов, выпуск расплавов и раскаленных газов из металлургических агрегатов (34% всех аварий), затем пожары и взрывы (31%). В 2018 г. доля последних составила 48.5% от всех техногенных аварий. Прямые последствия аварий на предприятиях – повреждения оборудования и зданий, а также выбросы и утечки загрязняющих веществ в природные компоненты.

[6] Генеральный план муниципального образования "Город Череповец". Т. 1. Череповец. 2020. 338 с. URL: https://st.cherinfo.ru>pages...materialy-po-obosnovaniu.docx

[7] URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/

Рис. 3. Соотношение количества ОПО и аварийности по видам экономической деятельности.

Существенный вклад в ухудшение геоэкологического состояния ГС оказывает складирование производственных отходов и ТКО. Отходы переработки сырья (13Т), порой чрезвычайно опасные, размещаются в хвосто- и шламохранилищах, занимающих большие площади, иногда в пределах городской застройки. Так, площадь территорий, занимаемых промышленными отходами металлургических предприятий, – более 1300 км^2, в золошлакоотвалах содержится около 2 млрд т веществ, отходы очистных сооружений достигают 100 млн т[8] и т.д. Для городов с ОПО характерно загрязнение почв токсикантами промышленного происхождения [4]. Загрязнение природных компонентов сопровождается изменением агрессивных свойств воды и грунтов, важных для инженерных объектов.

Статистика аварий за длительный период позволяет определить ориентировочную вероятность события. На рис. 4 на основе данных годовых отчетов о деятельности Ростехнадзора за 2016–2019 гг. приведена расчетная вероятность аварий на ОПО по видам экономической деятельности.

Видно, что максимальная вероятность проявления аварии характерна для ОПО угольной промышленности, а минимальная для ОПО хранения и переработки растительного сырья, возможно благодаря своей локальности и незначительных размеров.

Кроме вероятности проявления наиболее часто повторяющихся аварий следует учитывать фактор времени их проявления. Этот фактор также важен для оценки групп природно-техногенных опасностей, так как некоторые из них могут возникать внезапно, другие проявляются периодически или действуют постоянно (табл. 1).

К внезапным – можно отнести природно-техногенные группы опасностей, провоцируемые авариями на ОПО или естественными землетрясениями: II ПТ – техногенно-провально-просадочная группа, отличающаяся образованием отрицательных форм техногенного рельефа (воронки, пустоты, провалы, прогибы); III ПТ –

[8] URL: https://www.dpo.rudn.ru/data/novie-vozmojnosti-dlya-kajdogo/likvidazia-uwerba/1/module1.pdf

Рис. 4. Расчетная среднегодовая вероятность аварий на ОПО по видам экономической деятельности.

техногенно-гравитационная, характеризующаяся преимущественно положительными формами техногенного рельефа (отвалы, терриконики, оползни и т.д.); VI ПТ – аварийно-гидрологическая, провоцируемая аварией на ГТС.

Периодическое проявление опасностей характерно для развития оползней, а также техногенных землетрясений (I ПТ группа техногенно-сейсмическая), значительных утечек из водонесущих коммуникаций (III ПТ).

Длительным временем проявления отличается техногенно-грунтовая группа опасностей (IV ПТ) – наличие исходных слабых грунтов и накопление техногенных грунтов в процессе хозяйственной деятельности человека.

Постоянно действующие природно-техногенные опасности представлены тремя группами: техногенно-грунтовой (см. выше), техногенно-гидрогеологической – подтопления (V ПТ), радиационно-радоновой (VII ПТ).

Совместный анализ информации, представленной на рис. 1 и в табл. 1, позволяет сделать предположение об отсутствии связи между причинами формирования природно-техногенных опасностей и временном их проявлении.

В результате анализа взаимодействия природных и техногенных факторов авторы выделили

Таблица 1. Временной фактор проявления геоэкологических опасностей

Геоэкологическая опасность	Временно́е проявление			
	внезапное	периодическое	длительное	постоянное
Природная	1П	3П	2П; 5П	4П; 6П
Техногенная	9Т; 10Т; 11Т; 12Т	1Т; 8Т	2Т; 3Т; 4Т; 5Т; 7Т; 11Т; 13Т; 14Т	5Т; 6Т; 12Т
Природно-техногенная	II ПТ; III ПТ; VI ПТ	I ПТ; III ПТ	IV ПТ	IV ПТ; V ПТ; VII ПТ

семь групп природно-техногенных опасностей для ГС. Представленные на рис. 1 и рассмотренные в статье – это далеко не все возможные природно-техногенные опасности, а только наиболее часто встречающиеся. Одной из задач настоящего исследования было показать принципы и особенности формирования природно-техногенных опасностей.

ОБ ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

В научных публикациях и нормативных документах неоднократно предпринимались попытки классифицировать виды экономической деятельности по экологической опасности для природной среды в целом, а также по коэффициентам токсичности выбросов и сбросов загрязняющих веществ. Согласно существующим нормативным актам для отнесения того или иного предприятия к определенной категории опасности учитываются следующие условия: уровень негативного воздействия на окружающую среду; вид экономической деятельности; класс опасности сбрасываемых веществ; уровень токсичности, наличие мутагенных свойств в отходах; отнесение к объекту атомной энергетики.

Для обоснованной оценки рисков, интеграции статистики о них и причиняемом ущербе Ростехнадзор предложил Методику определения риск-ориентированного интегрального показателя промышленной безопасности (РОИП ПБ)[9]. Показатель рассчитывается путем установления связи между числовыми значениями групп факторов в баллах (с учетом их весов, определенных экспертным путем) и лингвистическими переменными, характеризующими показатели с позиций промышленной безопасности.

Применительно к урбанизированным территориям В.Н. Буровой [1] разработан подход к оценке природно-техногенной опасности через показатель риска. В качестве реципиентов относительно сложных инженерно-геологических условий выбраны застроенная жилая и транспортная зоны. Варианты сочетаний природных и техногенных факторов оцениваются в условных баллах, определенных экспертным путем. В результирующей матрице представлены оценки 530 возможных природно-техногенных ситуаций в баллах в зависимости от числа факторов, их значений и связей. Дальнейшее развитие этих исследований автору видится в необходимости соотнесения балльных оценок риска с экономическими эквивалентами.

Авторами настоящей статьи предлагается использовать в качестве показателя оценки природно-техногенной опасности – возможные отклики города на такое воздействие, количественно выражаемые величиной экономического ущерба. Привлечение стоимостных значений позволяет избежать проведения трудоемкой экспертной оценки и обеспечивает реальную сопоставимость получаемых результатов. По ориентировочным расчетам потенциальный ущерб от проявления только опасных природных процессов (подтопление, наводнения, оползневые и суффозионно-карстовые процессы, землетрясения), проведенным по 139 городам России с населением более 100 тыс. чел., в среднем на один город составил более 600 млн руб. (в ценах 2018 г.) [13].

В настоящее время в статистических материалах отсутствуют данные не только ущербов, но и показателей, позволяющих определить эту величину. В городах, как известно, больший ущерб наносят ОПО. В таком случае для подобной оценки могли бы оказаться полезными данные реестра НВОС. Однако эти показатели не являются достаточно открытыми. Кроме того, значения НВОС мизерные по сравнению с реальными ущербами, причиняемыми природным компонентам, человеку и самим объектам экономики. По данным Росстата, в 2018 г. плата за НВОС (13 млрд руб.) составила менее 2% относительно природоохранных затрат. Структура суммарных платежей за НВОС следующая: выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными объектами – 14.4%, сбросы загрязняющих веществ в водные объекты – 20.1%, размещение отходов производства и потребления – 62.4%, выбросы загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа – 3.1%.

Но существуют и другие виды негативного влияния на окружающую среду, которые налогом не облагаются. Например, загрязнение почв, превышение шума, вибрации или электромагнитных излучений, внезапное проявление опасных природных процессов, провоцируемое хозяйственной деятельностью, и др. могут приводить к значительным экономическим ущербам.

Ниже анализируются результаты оценки аварий на предприятиях. Среднегодовой ущерб от одной аварии, рассчитанный на основании данных годовых отчетов Ростехнадзора (2017–2019 гг.), колеблется по отраслям от менее 1 млн руб. до сотен миллионов рублей (рис. 5).

Максимальные значения получены для ОПО горнорудной промышленности, где преобладают аварии при проведении подземных работ (например, обрушение горной породы). Для открытых разработок эта величина меньше – 170 млн руб. [12]. Минимальные значения ущербов характерны для объектов производства и хранения взрывчатых материалов промышленного назначения,

[9] https://gpmliftservis.ru/uploads/files/20180409-120157.pdf

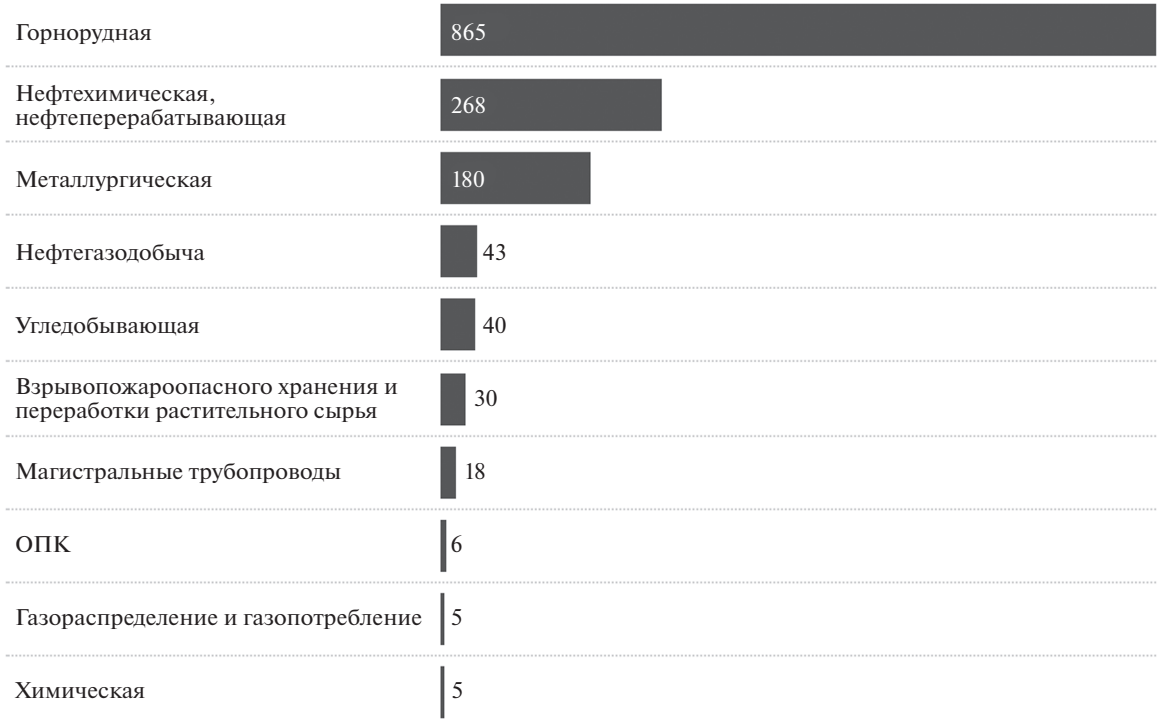


Рис. 5. Ориентировочный среднегодовой ущерб (млн руб.) от одной аварии по видам экономической деятельности.

Рис. 6. Показатели среднегодовых ущербов от аварий по некоторым отраслям и отдельным объектам.

химической отрасли и ОПК, возможно благодаря повышенному контролю безопасности на таких объектах.

Соотношение величин ущербов по некоторым отраслям и их отдельным объектам представлено на рис. 6.

Видно, что показатели ущербов, рассчитанные по примерам, превышают средние отраслевые показатели ущербов. Достаточная представительность примеров характерна для объектов нефтяной отрасли. Порядок отраслевых значений ущербов и значений по примерам близок для

нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий. При этом диапазон величин ущербов по отдельным ОПО значителен: от сотен тысяч до нескольких миллионов рублей, что указывает на огромное разнообразие видов и масштабов аварий.

По рассматриваемым видам экономической деятельности средний ущерб от одной аварии в 2018 г. составил 34 млн руб. в основном из-за разрушения оборудования и различных технических устройств. На долю же экологического ущерба приходится ориентировочно 3% этой суммы.

Сравнение значения НВОС и экологического ущерба заставляет думать об огромном недоучете экологической составляющей. Судя по примерам, экологический ущерб рассчитывается далеко не всегда и, как правило, в случаях загрязнения водных объектов. Оправданием этому являлись невозможность измерять степень воздействия ОПО на компоненты природы и отсутствие нормы определения необходимой платы.

Встает вопрос, возможно ли увеличить сумму НВОС за счет ежегодного прироста регистрируемых объектов, а также – введения новых, облагаемых налогом показателей рассмотренных выше природно-техногенных опасностей, реально существующих и оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Сегодня, когда ведутся мониторинги и прогнозируются опасные геологические процессы, осуществляется надзор за состоянием ОПО и их промышленной безопасностью, уже настало время изучения и разработки подходов к оценке и других воздействующих природно-техногенных негативных факторов, особенно в городах.

Для сохранения экологической безопасности страны выделяется очень мало бюджетных финансовых средств – 0.88% государственного консолидированного бюджета (2018 г.), эту долю необходимо увеличить до 7–12%, как в развитых странах мира [8]. При переходе на экономическую экологию, когда экология станет выгодной государству и экономике, необходимо расширить круг учитываемых негативов, дополнив их геоэкологическими видами. Наряду, с совершенствованием системы учета выбросов, сбросов, размещения промышленных отходов и ТКО, следует разработать систему дополнительных геоэкологических показателей, методику оценки последствий проявления природно-техногенных опасностей и соответствующие стоимостные нормативы. Средства, собираемые Росприроднадзором, должны направляться на решение именно экологических проблем, при этом платежи за НВОС должны быть выше стоимости ликвидации негативных последствий.

Учет полного экологического ущерба позволит увеличить бюджет страны, сейчас доля НВОС в прямом доходе консолидированного бюджета от природных ресурсов и природопользования в РФ 0.14%. Для сохранения и улучшения состояния окружающей среды, минимизации ущерба необходимо внедрять на ОПО успешные природоохранные технологии. При этом экономически выгоднее увеличить целевое выделение средств на природоохранные мероприятия, так как реабилитация природной среды в случае нанесения ей ущерба обходится существенно дороже, а отдаленные последствия негативного воздействия на окружающую среду могут быть непредсказуемы.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая схема структуры формирования возможных природно-техногенных геоэкологических опасностей на городской территории является первым шагом представления взаимодействия природных и техногенных опасностей. Необходимо отметить, что представленные группы природно-техногенных опасностей не охватывают всех возможных вариантов. Дальнейшее исследование предусматривает расширение учитываемых опасных факторов. Предложенный подход позволит перейти от частных показателей природных и техногенных индикаторов к комплексным природно-техногенным индикаторам геоэкологической оценки качества городской среды.

Основными источниками техногенного воздействия на геологическую среду в городе являются промышленные предприятия. Степень их влияния отражается на приведенных графиках по различным отраслям.

В целях улучшения экологической обстановки в городах и обеспечения их безопасности необходим полный учет негативных процессов и явлений, стимулируемый эффектом декаплинга – разрешения противоречия между интенсивной застройкой городов, приводящей к снижению устойчивости ГС (в связи с возрастающей разрушающей, статической и загрязняющей нагрузками) и сохранением экологической безопасности города (за счет увеличения доли инвестирования в охрану природной городской среды, включения геоэкологической составляющей в НВОС, снижения негативного воздействия предприятий на окружающую среду, предупреждения формирования природно-техногенных опасностей).

Существующее природоохранное законодательство отстает от требований сегодняшнего дня. Предлагаемая схема формирования природно-техногенных геоэкологических опасностей – начало пути к обоснованию, выделению и обязательному их учету в нормативных документах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бурова В.Н.* Основные принципы оценки риска урбанизированных территорий // Геоэкология. 2020. № 5. С. 78–88. https://doi.org/10.31857/S0869780920050021
2. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году”. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.
3. *Дьяконов К.Н., Дончева А.В.* Экологическое проектирование и экспертиза: учеб. для вузов / К.Н. Дьяконов, А.В. Дончева. М.: Аспект Пресс, 2002. 384 с.
4. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2019 году. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, 2020. 129 с.
5. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Матвеева Л.А.* Геоэкологическое районирование и градостроительное зонирование поселений уровня “городской округ – город” // Геоэкология. 2018. № 1. С. 68–78.
6. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Сависько И.С.* Геоэкологические ограничения при проектировании реорганизации городского пространства // Геоэкология. 2017. № 4. С. 82–96.
7. *Зайцев В.С.* Анализ природоохранной деятельности предприятий горно-металлургической отрасли на примере Череповецкого комбината ПАО “Северсталь” // Экономика в промышленности. 2020. Т. 13. № 2. С. 244–256.
8. *Калачев А.* В новой экологической политике экология станет экономической категорией. М., 2021. URL: https://regnum.ru/news/polit/3212412.html.
9. *Котлов Ф.В.* Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Недра, 1978. 262 с.
10. *Кофф Г.Л., Минакова Т.Б., Котлов В.Ф. и др.* Методические основы оценки техногенных изменений геологической среды городов. М.: Наука, 1990. 197 с.
11. *Кошелева О.Ю.* Оценка запечатанности почвенного покрова города Волгограда // Вестник ВГУ. Сер. География, геоэкология. 2019. № 1. С. 12–18.
12. *Лубенская О.А., Климова Е.В., Храмцов Б.А., Ростовцева А.А.* Оценка аварийности и производственного травматизма при разработке полезных ископаемых открытым способом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 140–144.
13. *Минакова Т.Б., Заиканов В.Г., Булдакова Е.В.* Геоэкологический след в городах России: подходы, оценки, результаты // Геоэкология. 2020. № 6. С. 83–94. https://doi.org/10.31857/S0869780920040098
14. *Петин А.Н., Крамчанинов Н.Н., Погорельцев И.А., Уколов И.М.* Оценка техногенного воздействия на подземные воды в зоне влияния Старооскольско-Губкинского промышленного комплекса // Известия Самарского национального центра РАН. 2013. Т. 15. № 3. С. 945–953.
15. *Сергеев Е.М.* Проблемы инженерной геологии в связи с охраной и рациональным использованием геологической среды // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1987. № 5. С. 77–86.
16. *Трофимов В.Т., Королев В.А.* Новые ноосферные представления о геологической среде // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2014. № 3. С. 61–65.
17. Экология и безопасность: Справочник [в 3-х т.] / Под. ред. Н.Г. Рыбальского. М.: ВНИИПИ, 1993. Т. 2. Ч. 4. С. 49–50.

NATURAL AND HUMAN-INDUCED GEOENVIRONMENTAL HAZARDS IN THE CITY: FORMATION, DYNAMICS, AND IMPACT

V. G. Zaikanov[a,#], T. B. Minakova[a], and E. V. Buldakova[#]

[a] Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101111 Russia

[#] E-mail: v.zaikanov@mail.ru

The problems of cities, including environmental problems, are directly proportional to their growth. Currently, dangerous production facilities and 75% of the country's population are concentrated in cities. The article describes possible hazardous human-induced factors and reveals their links with natural hazards. With a close interaction between natural and technogenous factors, new natural and human-induced hazards appear in the city, which are grouped into seven groups. The principle of their formation is also considered. To resolve the contradiction between intensive development, which leads to a decrease in the stability of the geological environment, and the need to preserve ecological safety of the city, it is necessary to justify, identify and consider the natural and human-induced geohazards in regulatory documents.

Keywords: *hazardous natural processes*, *human-induced factors*, *dangerous industrial enterprises*, *natural and human-induced hazards*, *economic damage*

REFERENCES

1. Burova, V.N. *Osnovnye printsipy otsenki riska urbanizirovannykh territorii* [The main principles of risk assessment in urbanized areas]. *Geoekologiya*, 2020, no. 5, pp. 78–88. https://doi.org/10.31857/S0869780920050021. (in Russian)
2. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2019 godu* [State Report "On the State and Environmental Protection of the Russian Federation in 2019"]. Moscow, Minprirody Rossii; MGU im. M.V. Lomonosova, 2020, 1000 p. (in Russian)
3. Dyakonov, K.N., Doncheva, A.V. *Ekologicheskoe proektirovanie i ekspertiza* [Environmental design and expertise]. Moscow, Aspekt Press, 2002, 384 p. (in Russian)
4. *Ezhegodnik. Zagryaznenie pochv Rossiiskoi Federatsii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2019 godu* [Yearbook. Contamination of soils of the Russian Federation with toxicants of industrial origin in 2019]. Obninsk, FGBU NPO Taifun, 2020, 129 p. (in Russian)
5. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Matveeva, L.A. *Geoekologicheskoe raionirovanie i gradostroitel'noe zonirovanie poselenii urovnya "gorodskoi okrug – gorod"* [Geoecological and urban zoning of settlements at the "city district – city" level]. *Geoekologiya*, 2018, no. 1, pp. 68–78. (in Russian)
6. Zaikanov, V.G., Minakova, T.B., Buldakova, E.V., Savis'ko, I.S. *Geoekologicheskie ogranicheniya pri proektirovanii reorganizatsii gorodskogo prostranstva* [Geoenvironmental constrains for planning rearrangement of urban space]. *Geoekologiya*, 2017, no. 4, pp. 82–96. (in Russian)
7. Zaitsev, V.S. *Analiz prirodookhrannoi deyatel'nosti predpriyatii gorno-metallurgicheskoj otrasli na primere Cherepovetskogo kombinata PAO "Severstal'"* [Analysis of environmental protection activities of mining and metallurgical enterprises on the example of the Cherepovets Combine of PJSC Severstal]. *Ekonomika v promyshlennosti*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 244–256. (in Russian)
8. Kalachev, A. *V novoi ekologicheskoi politike ekologiya stanet ekonomicheskoi kategoriei* [In the new environmental policy, ecology will become an economic category]. Moscow, 2021. URL: https://regnum.ru/news/polit/3212412.html.
9. Kotlov, F.V. *Izmenenie geologicheskoi sredy pod vliyaniem deyatel'nosti cheloveka* [Changes in the geological environment under the influence of human activity]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 262 p. (in Russian)
10. Koff, G.L., Minakova, T.B., Kotlov, V.F. et al. *Metodicheskie osnovy otsenki tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy gorodov* [Methodological bases for assessing technogenic changes in the geoenvironment of cities]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 197 p. (in Russian)
11. Kosheleva, O.Yu. *Otsenka zapechatannosti pochvennogo pokrova goroda Volgograda* [Assessment of sealing of the soil cover of the city of Volgograd]. *Vestnik VGU. Ser. Geografiya, geoekologiya*. 2019, no. 1, pp. 12–18. (in Russian)
12. Lubenskaya, O.A., Klimova, E.V., Khramtsov, B.A., Rostovtseva A.A. *Otsenka avariinosti i proizvodstvennogo travmatizma pri razrabotke poleznykh iskopaemykh otkrytym sposobom* [Assessment of accidents and industrial injuries during the open-pit mining]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2013, no. 1, pp. 140–144. (in Russian)
13. Minakova, T.B., Zaikanov, V.G., Buldakova, E.V. *Geoekologicheskii sled v gorodakh Rossii: podkhody, otsenki, rezul'taty* [Geoecological footprint in Russian cities: approaches, estimates, and results]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 83–94. DOI: 10.31857/S0869780920040098. (in Russian)
14. Petin, A.N., Kramchaninov, N.N., Pogorel'tsev, I.A., Ukolov, I.M. *Otsenka tekhnogennogo vozdeistviya na podzemnye vody v zone vliyaniya Starooskol'sko-Gubkinskogo promyshlennogo kompleksa* [Assessment of technogenic impact on groundwater in the zone of influence of the Starooskolsko-Gubkinsky industrial complex]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN,* 2013, vol. 15, no. 3, pp. 945–953. (in Russian)
15. Sergeev, E.M. *Problemy inzhenernoi geologii v svyazi s okhranoi i ratsional'nym ispol'zovaniem geologicheskoi sredy* [Problems of engineering geology in connection with the protection and rational use of the geological environment]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*. 1987, no. 5, pp. 77–86. (in Russian)
16. Trofimov, V.T., Korolev, V.A. *Novye noosfernye predstavleniya o geologicheskoi srede* [New noospheric ideas about the geological environment]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*, 2014, no. 3, pp. 61–65. (in Russian)
17. *Ekologiya i bezopasnost'* [Ecology and safety]: A reference book [in 3 vol.]. N.G. Rybalskii, Ed. Moscow, VNIIPI, 1993, vol. 2, part 4, pp. 49–50. (in Russian)

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 60–71

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА СТРУКТУРНЫХ КОНТАКТОВ В ДИСПЕРСНЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

© 2021 г. Ф. С. Карпенко[1,*], К. Н. Абросимов[2,], О. В. Сереброва[1]**

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

[2] Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

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

***E-mail: kv2@bk.ru*

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.
После доработки 02.07.2021 г.
Принята к публикации 02.07.2021 г.

Рассматриваются приемы и способы определения числа структурных контактов в глинистых грунтах – важной физико-химической характеристики их структурного строения. Проведенные исследования методом компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT) подтвердили возможность применения данного метода не только для исследования микроструктурного строения глинистых грунтов, но и для прямого определения числа контактов между минеральными частицами в них. На основании результатов исследований было уточнено количество контактов различного преобладающего типа в разновидностях дисперсных глинистых грунтов и получены эмпирические зависимости количества контактов в глинах от их гранулометрического состава. Полученные данные подтверждают разработанные В.Н. Соколовым модели микроструктурного строения разновидностей глинистых грунтов – “бидисперсную” и “перекашивающегося карточного домика”.

Ключевые слова: *глинистые грунты*, *структурные контакты*, *тип контакта*, *количество контактов*, *структурное строение*, *mCT*, *компьютерная томография*

DOI: 10.31857/S0869780921050064

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время строительство инженерных объектов и хозяйственное освоение территорий все более часто характеризуется повышенной сложностью и ответственностью сооружений, специфическими геологическими условиями и строением грунтов оснований, разнообразием и величиной нагрузок и воздействий на них. В таких условиях существенно возрастают требования к качеству инженерно-геологических исследований, результаты которых должны не только полно и объективно характеризовать свойства грунтов, но и давать достоверный прогноз их изменения в течение всего жизненного цикла инженерных объектов.

В практике грунтоведения в общем случае изучение свойств грунтов проводится по общепринятым методикам, основанным на положениях классической механики грунтов. Принципиальные положения этих методик применяются уже многие десятилетия, являются устоявшимися и, в целом, позволяют решать практические задачи изысканий. Наряду с этим, во многих случаях, результаты стандартных испытаний противоречат поведению грунтов в реальных условиях, и эти противоречия становятся более явственными при усложнении современных условий изысканий. В первую очередь эти противоречия возникают при исследованиях дисперсных глинистых грунтов и не имеют удовлетворительного объяснения с позиций действующей теории. Это связано с тем, что принципы классической механики, на которых основывается научно-методическая база грунтоведческих испытаний, не могут быть в полной мере отнесены к глинам, имеющим отличное от сплошных упругих тел строение.

Современные научные представления о строении глин, сформулированные в физико-химической теории прочности грунтов, рассматривают их как дисперсные системы, в которых вода не только заполняет поровое пространство, но и взаимодействует с минеральными частицами дисперсной фазы, образуя вокруг них гидратные пленки и формируя дисперсионную среду системы. В результате взаимодействия минеральных частиц между собой и гидратными пленками образуются структурные контакты, формирующие структуру грунта и определяющие его свойства, так как все напряжения, возникающие в грунте, передаются непосредственно на площадки кон-

тактов. Физико-химическая теория рассматривает не только внешние воздействия на грунт, но и вызванные ими изменения его структурного строения. Такой подход к исследованию свойств глинистых грунтов позволяет повысить объективность и достоверность их определения и прогноза изменения, при этом для его широкого практического применения необходимо решить ряд научно-методических вопросов, создающих затруднения и неопределенности при проведении исследований. Одним из таких важных вопросов является определение количества контактов между минеральными частицами грунта.

СТРУКТУРНОЕ СТРОЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

В основе современных представлений о строении глинистых грунтов лежат представления о дисперсных системах коллоидной и физической химии – положения фундаментальных теорий устойчивости дисперсных систем ДЛФО (сокр. от теория Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека), двойного электрического слоя (ДЭС), теории контактных взаимодействий П.А. Ребиндера и теории расклинивающего действия Б.В. Дерягина. Эти базовые теории были развиты применительно к глинистым дисперсным грунтам В.И. Осиповым, В.Н. Соколовым, Н.А. Румянцевой [6–8] и другими учеными и послужили основой разработанной в настоящее время физико-химической теории эффективных напряжений в грунтах.

Эта теория описывает структурообразование глин за счет формирования контактов между частицами глинистых минералов, при этом все внешние напряжения, действующие на грунт, передаются на площадки контактов и концентрируются там, а общая прочность глинистой дисперсной системы определяется суммарной прочностью отдельных контактов.

Для характеристики прочности глинистого грунта как дисперсной системы В.И. Осиповым [7] было введено понятие реальной эффективной прочности, которая характеризуется величиной реального эффективного напряжения σ'' на контактах при их разрушении. Эта величина зависит от общего эффективного давления в грунте σ', количества χ и площади a_c контактов и расклинивающего действия гидратных пленок $\Pi(h)$. Таким образом, количество контактов в глинистом грунте является одним из важных факторов, необходимым для общей характеристики самого грунта с позиций его структурного строения.

Прямое определение количества контактов между глинистыми частицами в грунте является сложной научной и практической задачей. Распространенных и общедоступных способов определения таких показателей в современной приборно-методической базе грунтоведческих исследований нет. Проводимые в данном направлении исследования ориентированы, в первую очередь, на разработку расчетных моделей, и их результаты важны не только с фундаментальных научных, но и с практических позиций.

Расчеты количества контактов в грунтах основаны на построении моделей строения дисперсных структур. П.А. Ребиндером, Е.Д. Щукиным и Л.Я. Марголисом [9] для дисперсных структур, сложенных сферическими частицами, была разработана глобулярная модель строения, представления о которой позднее были расширены Е.А. Амелиной и Е.Д. Щукиным [2]. Глобулярные модели построены из прямолинейных цепочек соприкасающихся сферических частиц, расположенных по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Места пересечения цепочек образуют узлы структуры, которая характеризуется структурным параметром N – средним количеством частиц между узлами, связанным с пористостью грунта n. Число контактов χ в единице площади зависит от величины параметра N и среднего радиуса частиц r.

В.Г. Бабак [3] для расчета числа контактов в рамках глобулярной модели предложил формулу, согласно которой число контактов χ зависит от величины координационного числа z, равной среднему числу контактов каждого структурного элемента с соседними, пористости n и среднего радиуса структурного элемента r.

Для расчета величины координационного числа (z) В. Филд (W.G. Field) [16] и В. Грей (W.A. Gray) [17] разработали различные формулы его зависимости от коэффициента пористости и пористости.

Глобулярная модель описывает строение систем, структурные элементы которой имеют форму, близкую к сферической, и может применяться по отношению к песчаным грунтам. Эта модель не учитывает анизотропию формы частиц глинистых минералов и не может применяться для достоверного описания структуры глинистых грунтов. Этот недостаток помогает устранить разработанная В.Н. Соколовым [12] “бидисперсная глобулярная модель”, на основе которой можно определить количество контактов в системе, сложенной частицами разного размера – крупными, с радиусом R, и мелкими, с радиусом r. Такая модель описывает строение супесей и легких суглинков, в составе которых присутствуют как глинистые, так и пылеватые и песчаные частицы, различающиеся по размеру. В соответствии с этой моделью, общее число контактов (χ) равно произведению числа контактов между крупными частицами (χ_R) и числа контактов между мелкими частицами (χ_r), находящимися в пределах площади контактов крупных частиц. Величины χ_R и χ_r

определяются в зависимости от плотности и содержания крупных и мелких частиц, соответственно ρ_R, ρ_r, φ_R и φ_r.

Расчеты, проведенные В.Н. Соколовым по бидисперсной глобулярной модели, показали, что число контактов в единице площади для суглинков может меняться в пределах $1.2 \cdot 10^7$–$1.0 \cdot 10^9$ см$^{-2}$.

Для глин, в строении которых решающую роль играют глинистые частицы анизотропичной формы, В.Н. Соколовым [11, 12] была разработана модель "перекашивающегося карточного домика", стенками которого являются тонкие диски, моделирующие глинистые частицы. Оценка степени уплотненности пород в этой модели дается через показатель θ – средней величины угла между частицами, связанной с пористостью *n*. Число контактов в такой модели рассчитывается в зависимости от величины θ, среднего значения диаметров *a* и толщины *b* дисков, которые могут быть определены при количественном анализе микроструктуры глины под растровым микроскопом.

Расчеты В.Н. Соколова по этой модели показали, что число контактов в единице площади для морской хвалынской глины составляет $3.9 \cdot 10^8$ см$^{-2}$.

Приведенные данные получены в результате сложных уникальных экспериментальных исследований. Их значение тем более высоко, что они являются основой для расчетов прочности индивидуальных контактов и реальных эффективных напряжений в глинистых грунтах.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описанные выше способы определения количества контактов в грунтах являются расчетными и основаны на моделировании структурного строения. При этом, на основе данных В.Н. Соколова ранее был проведен практический расчет количества контактов и их реальной эффективной прочности в разновидностях глинистых грунтов [5]. Полученные расчетные значения количества контактов в единичном объеме грунтов, приведенные в табл. 1, важны для определения реальных и общих эффективных напряжений в грунтах, тем не менее требуется их уточнение.

Для непосредственного определения количества контактов между частицами глинистых грунтов были проведены специальные компьютерные томографические исследования. Компьютерная томография – не повреждающий метод исследования, применяемый в различных сферах от исследования структуры материалов до внутреннего строения биологических объектов. Метод нашел свое применение и в исследовании структуры и микроструктуры почв [14, 20, 21, 23] и почвоподобных образований [1].

Исследования глин методом компьютерной томографии были проведены в Почвенном институте им. В.В. Докучаева в лаборатории физики и гидрологии почв Абросимовым К.Н. Для съемки и анализа томографических данных использовано оборудование и программное обеспечение (ПО) Bruker – микротомограф SkyScan 1172G, ПО CTan 1.18 (расчеты морфометрических показателей) и CTvox (визуализация объемной структуры).

Таблица 1. Число контактов в разновидностях глинистых грунтов

Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта (1 см^3)
глина тяжелая	$3 \cdot 10^8$
глина легкая	$2.7 \cdot 10^8$–$2.9 \cdot 10^8$
суглинок тяжелый	$2.4 \cdot 10^8$–$2.7 \cdot 10^8$
суглинок легкий	$2.1 \cdot 10^8$–$2.5 \cdot 10^8$
супесь	$1.9 \cdot 10^8$–$2.1 \cdot 10^8$

В настоящее время не существует стандартизированных методик томографического исследования почв и близких к ним по химическому составу объектов, поэтому авторы статьи использовали накопленный опыт в области томографии почв.

Для исследования было выбрано разрешение близкое к максимально детализированному – 1 мкм. Почвенные объекты аналогичного или близкого к нему разрешения уже исследовались методом компьютерной томографии [14, 21], но при этом влажность образцов не учитывалась. Наиболее близкий по микроструктуре и рентгеновскому поглощению объект естественного происхождения – лессовые структуры, был исследован авторами [1]. Исходя из этого опыта, были выбраны способы упаковки препарата для томографии, а также настройки съемки образцов глины и реконструкции их структуры.

Особенность микротомографа – высокое разрешение и качественную детализацию можно получить только в образцах небольшого размера. Так для разрешения 1 мкм диаметр образца должен быть около 2 мм. Кроме того, необходимо было избежать процессов усадки глины из-за высыхания и создать условия для хорошей центровки препарата в томографе. Образец глинистого грунта был помещен в трубку из прозрачного ПВХ с внутренним диаметром 1.9 мм, которая была затем загерметизирована пластилином, и вся конструкция помещена в медицинский шприц (рис. 1).

Томографическая съемка осуществлялась только для центральной части каждого препарата. При подготовке к анализу данные были сегментированы в ручном режиме (manual trasholding)

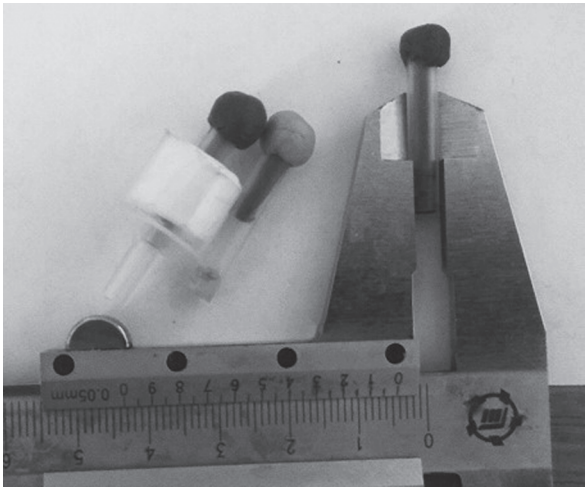


Рис. 1. Готовый препарат для томографической съемки.

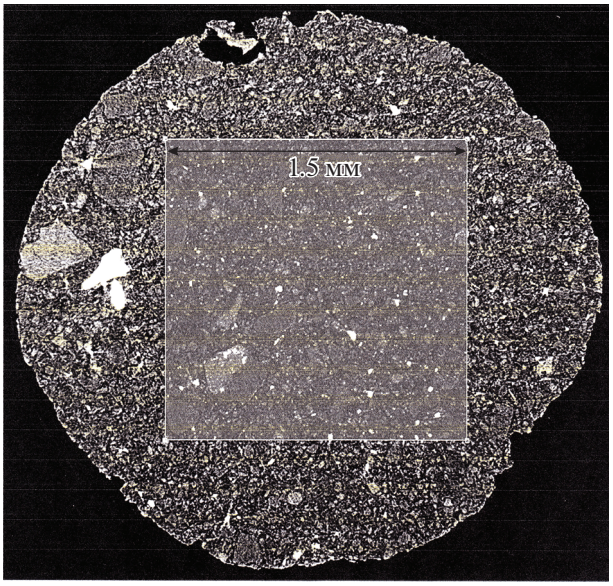


Рис. 2. Область расчетов морфометрических показателей на горизонтальном томографическом срезе.

на две рентген-контрастных фазы – минеральные частицы и поровое пространство (рис. 2).

Расчет морфометрических показателей производился по программному анализу объемной структуры образца в форме куба, вписанного в объем томографических данных со стороной 1.5 мм.

Анализ томографических данных (стека томографических изображений) позволяет получить показатели томографической пористости в объеме, а также ряд количественных показателей – количество объектов, количество связей (контактов) и количество закрытых пор (обособленных объектов). Доступны показатели объемов и площадей для каждой фазы, ориентация относительно заданного направления и показатель связности структур – число Эйлера. Количество объектов и количество контактов – составные параметры определения числа Эйлера (связности) [24], которые можно использовать как параллельно с ним, так и по отдельности. Можно настроить расчет локальной толщины элементов каждой из рентген-контрастных фаз [15, 22], что может показать различия при каком-либо физическом воздействии, например, изменении влажности и др.

Томографическая пористость – пористость по результатам анализа объемной структуры, состоящей из стека томографических изображений (срезов). Ее определение ограничено как минимум разрешением съемки (поры ниже разрешения будут невидны, или же пористо-зернистая структура, где поры и зерна одного размера, но ниже разрешения съемки, будет выглядеть на томографическом изображении как промежуточная фаза между порой и твердой фазой), а чаще всего сочетанием разрешения и результатом применения программных фильтров, используемых для борьбы с цифровыми шумами и прочими артефактами изображения. Значения томографической пористости могут отличаться от значений пористости, измеряемой более традиционными методами (ртутная порометрия и др.), особенно на пределе разрешения. При этом данный метод исследований позволяет не только определять общую пористость, но и выделять в ней количество закрытых пор, что является важным показателем, определяющим многие особенности строения и свойств глинистых грунтов [19]. В представленном исследовании авторы ограничились показателями общей и закрытой пористости, количества объектов и количества контактов (связей) для твердой фазы. Локальная толщина частиц твердой фазы и пор, а также эйлерова характеристика связности частиц твердой фазы использованы как вспомогательные показатели в качестве индикаторов неоднородности структуры (рис. 3, 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на образцах легкой моренной глины (*g*II*ms*). Для испытаний изготавливались искусственные монолиты полностью водонасыщенных грунтов в твердом, пластичном и текучем физико-химическом состояниях, соответственно, с преобладанием в их микроструктуре переходных точечных, ближних и дальних коагуляционных контактов [4]. По данным лабораторных исследований, выполненных по норма-

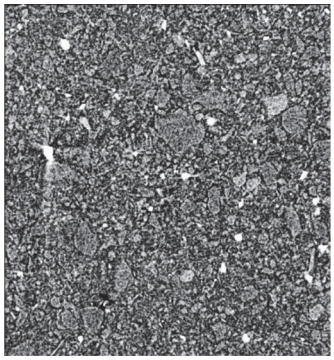
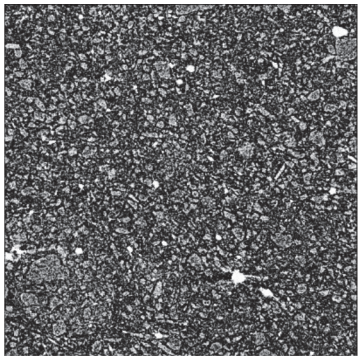
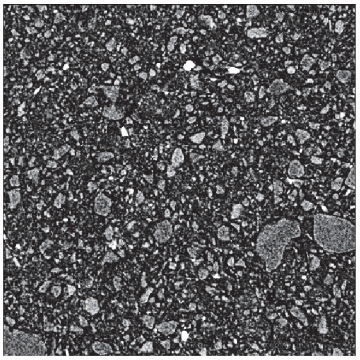
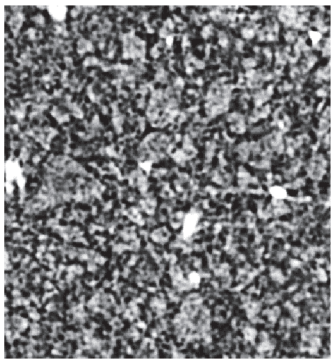
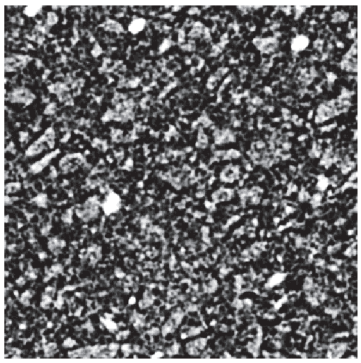
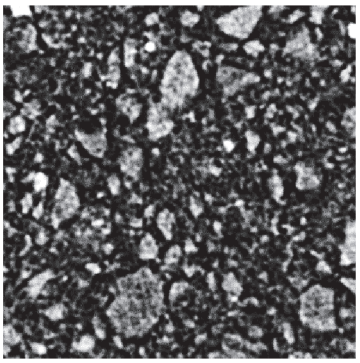
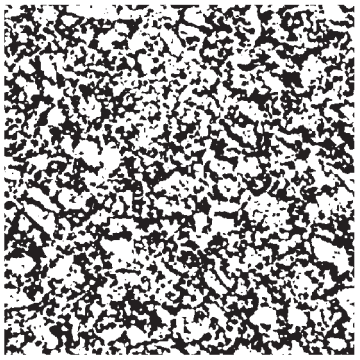
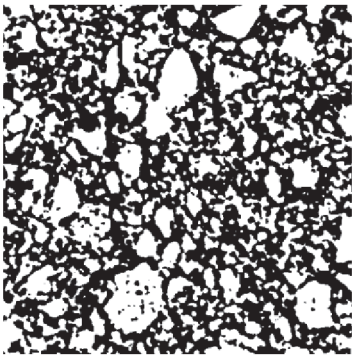
Вид изображения	Разновидность грунта		
	Глина легкая твердая	Глина легкая пластичная	Глина легкая текучая
Томографический срез, 1.5 мм по грани изображения			
Увеличенный фрагмент томографического среза, 0.5 мм			
Сегментированное изображение (0.5 мм)			

Рис. 3. Легкая глина, томографическое изображение внутренней структуры фрагмента образца и сегментированное изображение на поры (черный цвет) и твердую фазу (белый цвет).

тивам ГОСТ 12536[1] и ГОСТ 5180[2], влажность глин составляет 25% для твердой разновидности грунта, 35% – для пластичной и 45% – для текучей; плотность, соответственно, 2.02, 1.88 и 1.77 г/см^3, пористость – 40.6%, 48.8% и 55.1%, число пластичности – 17.7%. В гранулометрическом составе глин присутствуют частицы песчаной – 8.1%, пылеватой – 48.9% и глинистой фракций – 43%, при этом количество частиц 0.002-0.001 мм составляет 8.4%, а частиц мельче 0.001 мм – 34.6%.

На томографических изображениях исследованных образцов (см. рис. 3) показана их внутренняя структура. Визуально образцы отличаются друг от друга более высокой плотностью деталей на изображении твердой глины с улучшением детализации для пластичной и, особенно, текучей глины. Анализ томографических данных ос-

[1] ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200116022

[2] ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200126371

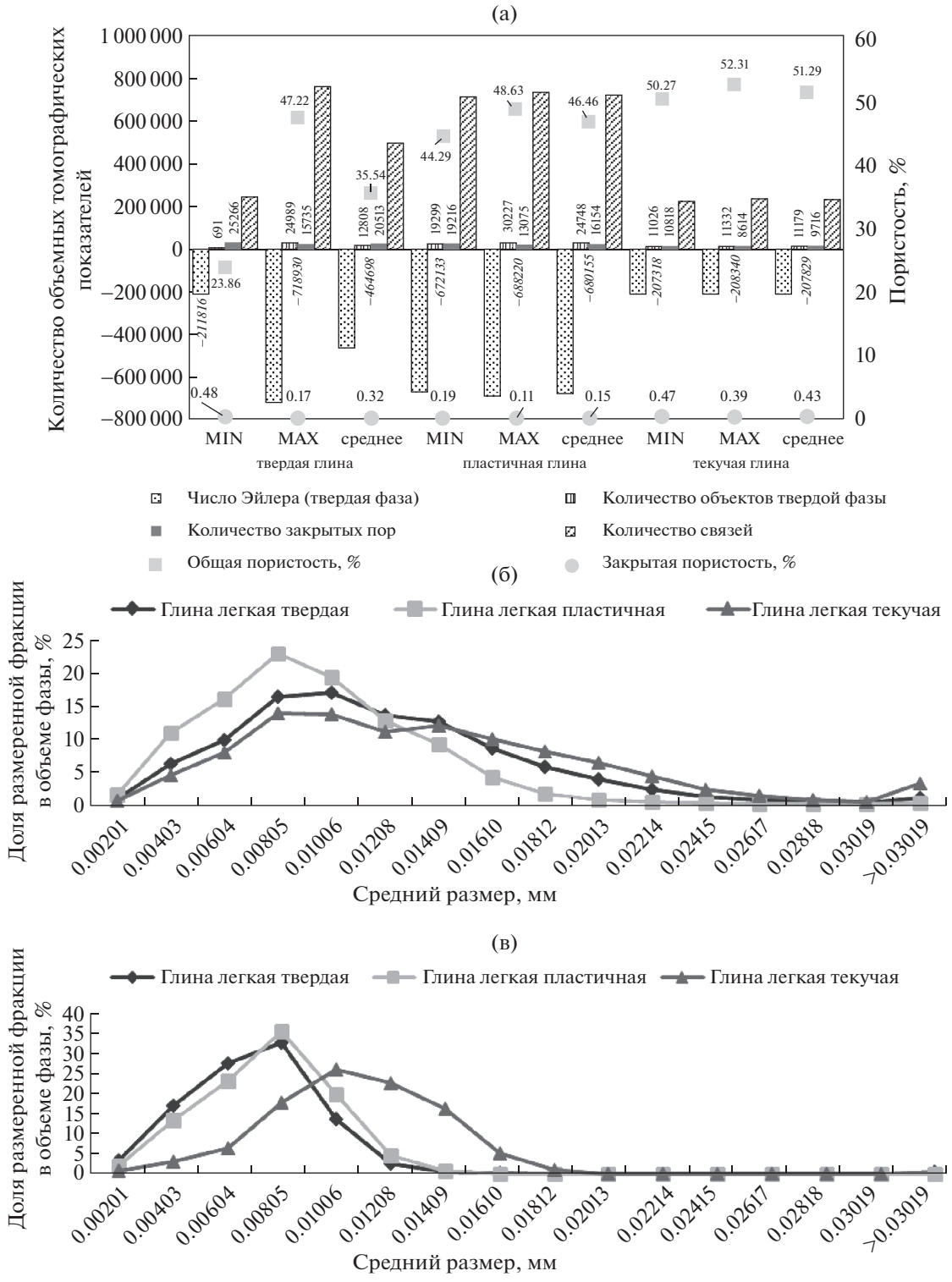


Рис. 4. Результаты анализа томографических данных. а – объемные томографические показатели; б – локальная толщина структурных элементов твердой фазы; в – локальная толщина элементов порового пространства.

нован на анализе сегментированного изображения на поровое пространство и твердую фазу. В его основе лежит разрешение съемки – точность сегментации. Учитывая плотное сложение твердой глины и выявленные неоднородности структуры (воздушные пузыри, частицы песка и др.), было проведено несколько расчетов в разных частях исследуемого образца, пересекающихся между собой.

Согласно анализу данных томографических исследований, общая пористость твердой разновидности глин – 35.6%, пластичной – 46.5%, те-

кучей – 51.3%, средний размер пор, соответственно, 0.0066, 0.0073 и 0.0107 мм. Для исследованных грунтов количество закрытых пор составляет 0.15–0.47%. Глины твердой консистенции характеризуются неоднородной по прочности и пористости структурой. В пластичной разновидности глин структура однородная с преобладанием более мелких твердых частиц, более пористая, сопоставимая по прочности с твердой. Глины текучей консистенции обладают наиболее однородной, высокопористой, самой непрочной структурой.

Значения количественных показателей структурного строения глинистых грунтов, определенные по анализу, в целом сильно зависят от качества изображения и его сегментации, в наименьшей степени это проявляется при определении показателей пористости. Сопоставление полученных результатов с результатами лабораторных исследований, проведенных по стандартным нормативным методикам ГОСТ, показывает их хорошую сходимость. Это свидетельствует о том, что объективные погрешности обработки томографических изображений не приводят к значительному снижению точности их результатов. Все это показывает, что метод компьютерной томографии позволяет достоверно и объективно исследовать и характеризовать строение и состав глинистых грунтов.

Определенные расхождения в количественных показателях можно объяснить особенностями анализируемого изображения. На рис. 3 показана структура и результат сегментации образцов, где видно, что более крупные частицы неоднородны по рентгеновской прозрачности и представлены разными градациями серого. Скорее всего это проявление внутренней пористости, частично видимой при используемом разрешении. Это то, что дает основную долю закрытых пор в анализируемых образцах, но и это же вносит искажения в показатели локальной толщины и особенно сильные – в расчет количественных показателей, таких как количество связей (контактов) и количество частиц. Программа-анализатор (CTan) считает частицу с внутренними порами не как одно целое, а как конгломерат более мелких частиц с большим количеством “толстых” связей между ними. Именно это привело к завышению показателей для пластичной глины (где по результатам локальная толщина частиц минимальна, а количество отдельных частиц самое большое).

Решение этой проблемы – сделать изображения контрастными с четко различимыми границами фаз, что будет предельно удобно для анализа [14]. Требуется серьезная методическая проработка вопроса точности применения компьютерной томографии грунтов на пределе разрешения прибора, чтобы утверждать о высокой степени достоверности полученных данных, когда их нельзя проверить другими методами. Томография способна показать минимальные различия в микроструктуре и поровом пространстве между образцами целой серии или выборки, главное – сделать так, чтобы сама серия соответствовала тому, что “есть на самом деле”, т.е. поры – это с максимальной вероятностью поры, а твердая фаза – это твердая фаза. С решением этой задачи могут справиться технологии машинного обучения [18].

Наряду с общей характеристикой строения грунтов, проведенные исследования позволили непосредственно определить количество контактов между частицами в них. Для твердой разновидности глины количество контактов в единичном объеме грунта составляет $2.78 \cdot 10^8$–$2.88 \cdot 10^8$ см$^{-3}$, что совпадает с расчетными данными, приведенными в табл. 1. Для пластичных разновидностей легких глин определенное количество контактов в единичном объеме грунта составило $2.58 \cdot 10^8$–$2.65 \cdot 10^8$ см$^{-3}$, для текучей глины – $2.29 \cdot 10^8$ см$^{-3}$. Эти результаты позволили уточнить результаты расчета количества контактов для пластичных и текучих глинистых грунтов с преобладающими ближними и дальними коагуляционными типами контактов, приведенные в табл. 2.

Вышеописанные методы исследований позволяют дать оценку количества контактов в глинистых грунтах, при этом в силу объективных причин их широкое практическое применение затруднительно. Для проведения таких определений в инженерно-геологических исследованиях требуется разработка методики оценки и расчета количества контактов в глинах по результатам общепринятых стандартных испытаний.

Очевидно, что одним из основных факторов, определяющих число контактов в глинах, служит их гранулометрический состав, а именно количество глинистых частиц в грунте. Однако связь между содержанием глинистой фракции и количеством контактов не является прямо пропорциональной, чему существует несколько причин, основные из которых будут рассмотрены ниже.

В практике грунтоведения принято разделение грунтов по размерности слагающих их частиц. Такой подход к выделению дисперсных фракций был заложен В.В. Охотиным и, с отдельными изменениями, применяется и в настоящее время. В соответствии с размером частиц в грунтах выделяются крупнообломочная, песчаная, пылеватая и глинистая фракции. При этом размерность глинистой фракции до сих пор остается дискуссионной. До недавнего времени к глинистой фракции относились частицы размером менее 0.005 мм, что было зафиксировано в нормативных документах, и выделение более мелких фракций в общей практике инженерно-геологических изысканий не проводилось. В настоящее время верхней

Таблица 2. Число контактов различного типа в разновидностях глинистых грунтов

Разновидность грунта по числу пластичности	Число контактов в элементарном объеме грунта (1 см^3) с преобладающим типом контактов		
	переходным точечным	ближним коагуляционным	дальним коагуляционным
глина тяжелая	$3.0 \cdot 10^8$–$3.2 \cdot 10^8$	$2.7 \cdot 10^8$–$3.0 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^8$–$2.6 \cdot 10^8$
глина легкая	$2.7 \cdot 10^8$–$2.9 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^8$–$2.7 \cdot 10^8$	$2.2 \cdot 10^8$–$2.4 \cdot 10^8$
суглинок тяжелый	$2.4 \cdot 10^8$–$2.7 \cdot 10^8$	$2.2 \cdot 10^8$–$2.5 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^8$–$2.2 \cdot 10^8$
суглинок легкий	$2.1 \cdot 10^8$–$2.5 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^8$–$2.3 \cdot 10^8$	$1.7 \cdot 10^8$–$2.0 \cdot 10^8$
супесь	$1.9 \cdot 10^8$–$2.1 \cdot 10^8$	$1.7 \cdot 10^8$–$2.0 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^8$–$1.7 \cdot 10^8$

границей глинистой фракции признана размерность частиц 0.002 мм, это положение закреплено в современных действующих нормативных документах ГОСТ 25100[3] и ГОСТ 12536. В то же время многие ученые придерживаются мнения, что к глинистой фракции следует относить частицы мельче 0.001 мм [10, 13]. При этом в практике изысканий принято считать, что содержание частиц глинистой фракции в грунтах соответствует содержанию в них глинистых минералов, определяющих их физико-химические свойства. Это далеко не всегда соответствует действительности и, в общем случае, проводить аналогию между содержанием глинистой фракции и количеством глинистых минералов неправомерно. Этот вопрос был подробно рассмотрен В.Г. Шлыковым [13], который показал, что в составе глинистой фракции могут находиться как глинистые, так и неглинистые минералы, так же как частицы глинистых минералов могут иметь размеры, соответствующие пылеватой фракции, соответственно, содержание глинистой фракции в грунтах и ее верхний размер в общем случае не отражают их минеральный состав и свойства.

Для определения взаимосвязи содержания глинистой фракции грунтов и количества контактов для разновидностей моренных грунтов (*g*II*ms*) был проведен сравнительный анализ содержания частиц мельче 0.005 мм, 0.002 мм, определенных по нормативам ГОСТ 12536, и мельче 0.001 мм – по нормативам ASTM[4], с расчетными показателями количества контактов для тех же грунтов, приведенными в табл. 2.

Анализ образцов естественного сложения и искусственных монолитов (всего более 150) показал, что наилучшей взаимосвязью с расчетными данными по количеству контактов обладает фракция частиц размером менее 0.002 мм. Эта зависимость, характерный график которой показан на рис. 5, имеет два различных тренда – для глин (линия 1 на рис. 5) и для супесей и легких суглинков (линия 2 на рис. 5). Для исследованных грунтов зависимости количества контактов (χ) от содержания фракции <0.002 мм (N) для каждого из преобладающих типов контактов описываются эмпирическими уравнениями, приведенными в табл. 3, с достоверностью аппроксимации 0.98–1.00.

Тяжелые суглинки занимают в этом ряду промежуточное положение, для них зависимость числа контактов от содержания гранулометрической глинистой фракции может определяться как одним, так и другим уравнением.

Для фракций <0.005 мм зависимость количества контактов от содержания частиц носит, в целом, характер, аналогичный описанному выше для частиц мельче 0.002 мм, но имеет более низкий коэффициент корреляции рассматриваемых параметров (0.63–0.93). Это показывает, что содержание в грунтах гранулометрической фракции размером <0.002 мм в наибольшей степени соответствует содержанию в них глинистых частиц.

Двойственный характер зависимости определяется особенностями микроструктурного строения глинистых грунтов. Как уже было показано выше, в строении тяжелых и легких глин основную роль играют собственно глинистые частицы, и их структура описывается моделью “перекашивающего карточного домика”, разработанной и описанной В.Н. Соколовым. Для супесчаных и суглинистых грунтов характерно наличие в составе, наряду с глинистыми, значительного количества пылеватых и песчаных частиц. Их строение описывается бидисперсной структурой, предложенной также В.Н. Соколовым. Тяжелые суглинки, характеризующиеся промежуточным между супесчано-суглинистыми и глинистыми разновидностями грунтов составом, имеют в своем строении элементы как бидисперсной структуры, так и структуры перекашивающего карточного домика. Такое строение тяжелых суглинков определяет то, что количество контактов в них описывается закономерностями, характерными как для

[3] ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 42 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095052

[4] ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007. URL: https://www.astm.org/Standards/D422.

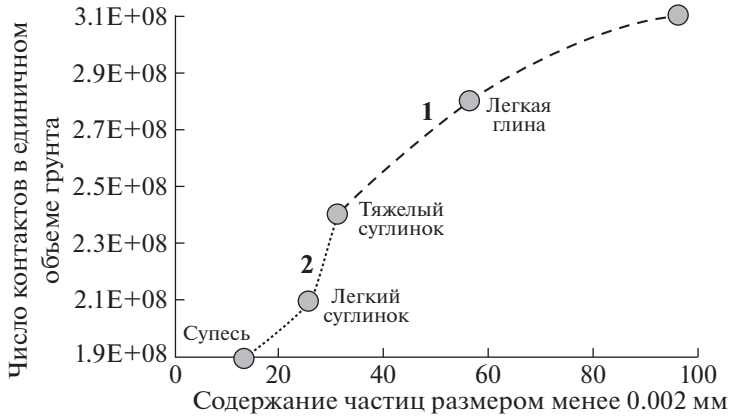


Рис. 5. Характер зависимости количества контактов в глинистых грунтах от гранулометрического состава.

супесчано-суглинистых, так и для глинистых разновидностей.

ВЫВОДЫ

В современных научных представлениях о строении и свойствах глин все большее значение приобретает физико-химический подход. Глинистые грунты рассматриваются как дисперсные системы, строение и свойства которых определяются результатом взаимодействия глинистых минеральных частиц и формированием контактов между ними. Такой подход позволяет разрешить многие противоречия, возникающие при рассмотрении свойств глинистых грунтов с позиций физики сплошных упругих тел, однако его практическое применение в инженерно-геологических исследованиях встречает ряд затруднений. Отдельные научно-методические вопросы до сих пор не имеют однозначного решения.

Одним из таких важных вопросов является методика определения количества контактов между частицами глинистых дисперсных систем, которое необходимо для определения величины реальных эффективных напряжений в грунте. Отдельные успешные исследования этого вопроса являются, по сути, уникальными исследованиями, и их широкое применение в практических изысканиях пока затруднено.

В то же время при изучении микростроения глинистых пород может успешно применяться метод компьютерной рентгеновской томографии (X-ray mCT). Результаты проведенных исследований показали, что характеристики внутреннего строения глинистых грунтов, определенные методом анализа томографических изображений, имеют высокую сходимость со значениями тех же характеристик, определенными по стандартным методикам, принятым в практике грунтоведения.

При этом томографические исследования позволяют увеличить количество показателей структурного строения грунтов. Одним из таких показателей является количество контактов между минеральными частицами, определяемое их непосредственным подсчетом в исследуемом объеме. Полученные результаты позволили уточнить количество контактов в разновидностях глинистых грунтов с различным преобладающим их ти-

Таблица 3. Зависимость числа контактов в единичном объеме глинистых грунтов от их гранулометрического состава

Разновидности грунтов	Преобладающий тип контактов	Зависимость числа контактов (χ) в 1 см^3 от содержания частиц (N) размером менее 0.002 мм, %
Тяжелые и легкие глины	переходный точечный	$\chi = N \cdot 1^6 + 2^8$
	ближний коагуляционный	$\chi = N \cdot 774225 + 2^8$
	дальний коагуляционный	$\chi = N \cdot 678577 + 2^8$
Легкие суглинки и супеси	переходный точечный	$\chi = N \cdot 3^6 + 2^8$
	ближний коагуляционный	$\chi = N \cdot 3^6 + 1^8$
	дальний коагуляционный	$\chi = N \cdot 2^6 + 1^8$

пом, расчет которых был проведен авторами ранее.

На основании результатов проведенных исследований были получены эмпирические зависимости количества контактов в грунте от его гранулометрического состава для разновидностей глинистых грунтов. Наиболее корректно число контактов описывается зависимостью от содержания частиц фракции <0.002 мм. Зависимость имеет различный характер для тяжелых и легких глин и супесчано-суглинистых разновидностей, при этом тяжелые суглинки занимают промежуточное положение, количество контактов в них может быть описано как одной, так и другой корреляцией.

Такой характер распределения контактов в глинистых грунтах определяется особенностями их микроструктурного строения. Тяжелые и легкие глины, в строении которых основную роль играют собственно глинистые частицы, имеют структуру “перекашивающего карточного домика”. Для супесчаных и суглинистых грунтов характерно наличие в составе, наряду с глинистыми, значительного количества пылеватых и песчаных частиц, и их строение описывается бидисперсной структурой [12]. Тяжелые суглинки, характеризующиеся промежуточным между супесчано-суглинистыми и глинистыми разновидностями грунтов составом, имеют в своем строении элементы как бидисперсной структуры, так и структуры “перекашивающего карточного домика”.

Полученные данные, бесспорно, требуют своего дальнейшего изучения и уточнения, но на начальном этапе могут применяться для определения реальной эффективной прочности.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания по теме НИР № г.р. АААА-А19-19021190077-6.

Томографическая съемка выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием "Функции и свойства почв и почвенного покрова" Почвенного институт им. В.В. Докучаева (рег. номер 441994, https://ckp-rf.ru442994).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абросимов К.Н., Макеев А.О., Багрова С.М.* Микроструктура и поровое пространство лессовых отложений нижней Волги // Экология и палеоэкология почв и палеопочв. Новосибирск: Издательский дом ООО “Окарина”, 2017. С. 7–12.
2. *Амелина Е.А., Щукин Е.Д.* Изучение некоторых закономерностей формирования контактов в пористых дисперсных структурах // Коллоидн. журнал. 1970. Т. 32. № 6. С. 795–800.
3. *Бабак В.Г.* Прочность пористых твердых тел // Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1974. 20 с.
4. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа пределов пластичности глинистых грунтов // Геоэкология. 2018. № 5. С. 66–72. https://doi.org/10.1134/S86978031804004X
5. *Карпенко Ф.С.* Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. 2019. № 5. С. 48–60. https://doi.org/10.31857/S869-78092019548-60
6. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 210 с.
7. *Осипов В.И.* Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.: ИФЗ РАН, 2012. 74 с.
8. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.
9. *Ребиндер П.А., Щукин Е.Д., Марголис Л.Я.* О механической прочности пористых дисперсных тел // ДАН. 1964. Т. 154. № 3. С. 695–698.
10. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др.* Грунтоведение (Изд. 4). М.: Изд-во МГУ, 1983. 386 с.
11. *Соколов В.Н.* Физико-химические аспекты механического поведения глинистых грунтов // Инженерная геология. 1985. № 4. С. 28–41.
12. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 32–40.
13. *Шлыков В.Г.* Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. М.: ГЕОС. 2006. 176 с.
14. *Abrosimov K.N., Gerke K.M., Semenkov I.N., Korost D.V.* Otsu’s algorithm in the segmentation of pore space in soils based on tomographic data // Eurasian Soil Science. 2021. V. 54. № 4. P. 560–571. https://doi.org/10.1134/S1064229321040037
15. *Chiang Martin Y.M., Landis F.A., Xianfeng Wang, Smith J.R., Cicerone M.T., Dunkers J., Luo Yanfeng.* Local Thickness and Anisotropy Approaches to Characterize Pore Size Distribution of Three-Dimensional Porous Networks. Tissue Eng. Part C: Methods. 2009. P. 65–76. https://doi.org/10.189/ten.tec.208.0298
16. *Field W.G.* Towards the statistical definition of a granular mass // Proc. 4th Australia-New Zealand conf. on solid mechanics, 1963. P. 143–148.
17. *Gray W.A.* The packing of solid particles. Chapman and Yall Ltd., 1968. 236 p.
18. *Lavrukhin E.V., Gerke K.M., Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Karsanina M.V.* Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil xct images based on pore-scale modelling of saturated flow properties // Soil and Tillage Research. 2021. V. 209. P. 104942.
19. *Osipov V.I., Karpenko F.S., Rumyantseva N.A.* Active porosity and its effect on the physical mechanical properties of clay // Water Resources. 2015. V. 42. № 7. P. 951–957.

20. *Romanis T., Sedov S., Lev S., et al.* // Landscape change and occupation history in the Central Russian Upland from Upper Palaeolithic to medieval: Paleopedological record from Zaraysk Kremlin, CATENA, 2021. V. 196: 104873.
https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104873

21. *Sorokin A.S., Abrosimov K.N., Lebedeva M.P., Kust G.S.* Composition and structure of aggregates from compacted soil horizons in the southern steppe zone of European Russia // Eurasian Soil Science. 2016. V. 49. № 3. P. 326–337.
https://doi.org/10.1134/S106422931603018

22. *Yudina A.V., Romanenko K.A.* Mechanistic Understanding of Soil Hierarchical Structure, EGU General Assembly 2019.
https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26167.16809

23. *Skvortsova E.B., Shein E.V., Abrosimov K.N., Gerke K.M., Korost D.V., Romanenko K.A., Belokhin V.S., Dembovetskii A.V.* Tomography in soil science // Bulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva. 2016. V. 86. P. 28–34.

24. *Vogel H.-J.* Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections // European J. of Soil Sc. 1997. 48. P. 365–377.
https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00203.x

CALCULATION OF THE NUMBER OF STRUCTURAL CONTACTS IN CLAY DISPERSE SOILS

F. S. Karpenko[a,#], K. N. Abrosimov[b,##], and O. V. Serebrova[a]

[a] *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science, Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*
[b] *Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevskii per. 7, str. 2, Moscow, 119017 Russia*
[#] *E-mail: kafs08@bk.ru*
[##] *E-mail: kv2@bk.ru*

The paper considers important issues of calculating the number of structural contacts in clay soils, which is an important physicochemical characteristic of their structure. The studies carried out by the computed X-ray tomography (X-ray mCT) proved the possibility of applying this method not only for analyzing clay microstructure, but also for direct calculation of the number of contacts between mineral particles. The research results permitted us to assess the number of contacts of various predominant types in the clay soil varieties and to obtain empirical dependences between the number of contacts in clays and their particle-size distribution. The obtained data correspond to the models of clay microstructures developed by V.N. Sokolov, i.e., the "bidisperse" model and the model of the "skewing playing card house".

Keywords: *clay soils*, *structural contacts*, *type of contacts*, *number of contacts*, *structural composition*, *mCT*, *computed tomography*

REFERENCES

1. Abrosimov, K.N., Makeev, A.O., Bagrova, S.M. *Mikrostruktura i porovoe prostranstvo lessovykh otlozhenii nizhnei Volgi* [Microstructure and pore space of loess sediments of the lower Volga]. *Ekologiya i paleoekologiya pochv i paleopochv*. Novosibirsk, Okarina Publ., 2017, pp. 7–12. (in Russian)

2. Amelina, E.A., Shchyukin, E.D. *Izuchenie nekotorykh zakonomernostei formirovaniya kontaktov v poristykh dispersnykh strukturakh* [Study of some regularities of contact formation in porous dispersed structures]. *Kolloidnyi zhurnal,* 1970, vol. 32, no. 6, pp. 795–800. (in Russian)

3. Babak, V.G. *Prochnost' poristykh tverdykh tel* [Porous solids strength]. Extended abstract of Cand. Sci. (Phys.-Mat.) Dissertation, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1970, 20 p. (in Russian)

4. Karpenko, F.S. *Fiziko-khimicheskaya priroda predelov plastichnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil plasticity limits]. *Geoekologiya*, 2018, no. 5, pp. 66–72.
https://doi.org/10.1134/S86978031804004X. (in Russian)

5. Karpenko F.S. *Fiziko-khimkicheskaya priroda prochnosti glinistykh gruntov* [Physicochemical nature of clayey soil strength]. *Geoekologiya*, 2019, no. 5, pp. 48–60. https://doi.org/10.31857/S869-78092019548-60. (in Russian)

6. Osipov, V.I., Sokolov, V.N., Rumyantseva, N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay soils]. E.M. Sergeev, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1989, 210 p. (in Russian).

7. Osipov, V.I. *Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh* [Physicochemical theory of effective stresses in soils]. Moscow, IFZ RAN. 2012, 74 p. (in Russian)

8. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoistva. Sostav, stroeniye i formirovanie svoistv* [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 576 p. (in Russian)

9. Rebinder, P.A., Shchyukin, E.D., Margolis, L.Ya. *O mekhanicheskoi prochnosti poristykh dispersnykh tel* [On the mechanical strength of porous dispersed bodies]. *DAN,* 1964, vol. 154, no. 3, pp. 695–698. (in Russian)

10. Sergeev, E.M., Golodkovskaya, G.A., Ziangirov, R.S. and etc. *Gruntovedeniye* [Soil and Rock Engineering].

Ed. 4. Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1983, 386 p. (in Russian)

11. Sokolov, V.N. *Fiziko-khimicheskie aspekty mekhanicheskogo povedeniya glinistykh gruntov* [Physicochemical aspects of the mechanical behavior of clay soils]. *Inzhenernaya geologiya*, 1985, no. 4, pp. 28–41. (in Russian)
12. Sokolov, V.N. *Modeli mikrostruktur glinistylh gruntov* [Clay microstructure models]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6, pp. 32–40. (in Russian)
13. Shlykov, V.G. *Rentgenovskii analiz mineral'nogo sostava dispersnykh gruntov* [X-ray analysis of mineral composition of dispersed soils]. Moscow, GEOS Publ., 2006, 176 p. (in Russian)
14. Abrosimov, K.N., Gerke K.M., Semenkov, I.N., Korost, D.V. Otsu's algorithm in the segmentation of pore space in soils based on tomographic data. *Eurasian Soil Science*. 2021, vol. 54, no. 4, pp. 560–571. https://doi.org/10.1134/S1064229321040037
15. Chiang, Martin Y.M., Landis, F.A., Xianfeng, Wang, Smith, J.R., Cicerone, M.T., Dunkers, J., Luo, Yanfeng. Local thickness and anisotropy approaches to characterize pore size distribution of three-dimensional porous networks. *Tissue Eng. Part C: Methods*. 2009. Pp. 65–76. http://doi.org/10.1089/ten.tec.2008.0298
16. Field, W.G. Towards the statistical definition of a granular mass. Proc. 4th Australia-New Zealand Conf. on Solid Mechanics, 1963, pp. 143–148.
17. Gray, W.A. The packing of solid particles. Chapman and Yall Ltd. 1968, 236 p.
18. Lavrukhin, E.V., Gerke, K.M., Romanenko, K.A., Abrosimov, K.N., Karsanina, M.V. Assessing the fidelity of neural network-based segmentation of soil xct images based on pore-scale modelling of saturated flow properties. *Soil and Tillage Research*., 2021, vol. 209, p. 104942.
19. Osipov, V.I., Karpenko, F.S., Rumyantseva, N.A. Active porosity and its effect on the physical mechanical properties of clay. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 951–957.
20. Romanis, T., Sedov, S., Lev, S., et al. Landscape change and occupation history in the Central Russian Upland from Upper Palaeolithic to Medieval: paleopedological record from Zaraysk Kremlin. Catena Publ., vol. 196, 2021, p. 104873. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104873.
21. Sorokin, A.S., Abrosimov, K.N., Lebedeva, M.P., Kust, G.S. Composition and structure of aggregates from compacted soil horizons in the southern steppe zone of European Russia. *Eurasian Soil Science*. 2016, vol. 49, no. 3, pp. 326–337. https://doi.org/10.1134/S1064229316030108
22. Yudina, A.V., Romanenko, K.A. Mechanistic understanding of soil hierarchical structure. *EGU General Assembly 2019*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26167.16809
23. Skvortsova, E.B., Shein, E.V., Abrosimov, K.N., Gerke, K.M., Korost, D.V., Romanenko, K.A., Belokhin, V.S., Dembovetskii, A.V. Tomography in soil science. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2016, vol. 86, pp. 28–34.
24. Vogel, H.-J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. *European J. of Soil Sc.* 1997. 48, pp. 365–377. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00203.x

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 72–86

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.3.06; 556.3.07

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗОНЫ АЭРАЦИИ И НАСЫЩЕННОЙ ЗОНЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА ДО ОБЛАСТИ РАЗГРУЗКИ

© 2021 г. Е. В. Кононченко[1,*], А. Б. Петраш[1,]**

[1] ФГБУ "Гидроспецгеология", ул. Маршала Рыбалко, 4, Москва, 123060 Россия

**E-mail: lena.konon@mail.ru*

***E-mail: A.B.Petrash@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.03.2021 г.
После доработки 27.05.2021 г.
Принята к публикации 05.08.2021 г.

В статье представлена методика создания комплекса моделей зоны аэрации и насыщенной зоны, позволяющая количественно охарактеризовать миграцию загрязнения от приповерхностного источника до зеркала грунтовых вод и до областей разгрузки геофильтрационного потока. Применение методики рассмотрено на примере района с выявленным хлоридным загрязнением подземных вод. Источником загрязнения является солехранилище, которое эксплуатировалось в период 1967–2007 гг. Снижения концентраций хлорид-иона вследствие деградации ореола после ликвидации источника загрязнения не наблюдается, что связано с формированием вторичного источника (зоны засоления) в зоне аэрации. Для рассматриваемого района проведена разработка моделей зоны аэрации и насыщенной зоны. Модель насыщенной зоны откалибрована по данным мониторинга (уровень грунтовых вод и концентрация хлорид-иона). Ореол хлорид-иона в потоке грунтовых вод воспроизведен на модели в абсолютных концентрациях. Расчеты миграции загрязнения в зоне аэрации проведены в относительных концентрациях. По результатам моделирования определены временные интервалы, характеризующие этапы формирования ореола загрязнения за время эксплуатации солехранилища, а также этапы деградации ореола после его ликвидации. Проведена оценка влияния параметров моделей обеих зон на результаты геомиграционных расчетов, выявившая наиболее значимые из них. Рассмотрен ряд модельных сценариев (консервативных и более мягких), позволивших определить вариативность модельных прогнозов. На основе ретроспективных комплексных модельных расчетов и данных мониторинга получены уточненные параметры, характеризующие отложения зоны аэрации.

Ключевые слова: *численное моделирование*, *зона аэрации*, *насыщенная зона*, *подземные воды*, *миграция загрязнения*

DOI: 10.31857/S0869780921050076

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение подземной гидросферы в результате деятельности человека относится в настоящее время к одной из наиболее актуальных мировых проблем. Его возникновение зачастую связано с действием техногенных источников, расположенных на поверхности земли и в приповерхностной зоне, вследствие чего загрязняющие вещества поступают, в первую очередь, в зону аэрации (ЗА), а затем формируют ореолы в подземных водах, мигрируя вместе с геофильтрационным потоком до областей разгрузки.

Для решения прогнозных геомиграционных задач широко используются методы численного моделирования с помощью программных средств, позволяющих рассчитывать распространение контаминантов в ЗА и насыщенной зоне (НЗ), как в рамках единой модели [10, 18], так и отдельно для каждой зоны [9, 19]. Расчет распространения загрязнения в рамках единой модели целесообразен при сопоставимых масштабах переноса в ЗА и НЗ. Однако данный подход сопряжен с объективными сложностями, среди которых можно назвать сильную нелинейность связи параметров, определяющих влагоперенос в ЗА и входящих в уравнение Ричардса [5], что вызывает проблемы со сходимостью решения при расчетах влагопереноса. Кроме того, в перечисленных программах отсутствуют средства создания моделей со сложным геологическим строением, а также возможности автоматической калибровки гео-

фильтрационной модели по уровням. Разработка двух моделей миграции загрязнения отдельно для каждой зоны, с одной стороны, позволяет преодолеть описанные выше сложности. С другой стороны, возникает необходимость согласования результатов, полученных на каждой модели, для их совместного использования.

Цель настоящей работы – разработка методики, включающей в себя создание комплекса математических моделей обеих зон с совмещением получаемых результатов и позволяющей провести количественную прогнозную оценку влияния приповерхностного источника загрязнения на подземные и поверхностные воды в различных сценариях, а также оценить чувствительность и вариативность модельных параметров.

Применение методики рассмотрено на примере района, где выявлено хлоридное загрязнение подземных вод. Загрязнение в течение 12 лет поступает от вторичного источника в ЗА после ликвидации первичного источника.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ ЗОНЫ АЭРАЦИИ И НАСЫЩЕННОЙ ЗОНЫ

Методика создания комплекса моделей состоит из нескольких этапов, первый из которых – всесторонний анализ природно-техногенных условий изучаемого района, данных мониторинга и другого фактического материала. Следующим важным этапом является работа по независимой оценке инфильтрационного питания (ИП) и эвапотранспирации (ЭТ).

Перед началом разработки комплекса моделей необходимо решить вопрос о целесообразности рассмотрения миграции загрязнения в ЗА для конкретного района исследований. Это можно сделать на основе качественной оценки защитных свойств отложений ЗА [2]. Важно подчеркнуть, что все характеристики ЗА (мощность, фильтрационные, водно-физические и сорбционные свойства) нужно рассматривать совместно, поскольку ЗА, имея мощность даже первые метры, может обладать значительными задерживающими свойствами по отношению к определенным видам загрязнения. Также возможна количественная экспресс-оценка времени миграции загрязнения в ЗА, например, с использованием известной формулы Н.Н. Биндемана [7].

Разработка одномерной модели ЗА (с учетом преимущественно вертикальной миграции в ней загрязнения) и 3-мерной модели НЗ проводится отдельно. В связи с этим возникает необходимость выбора последовательности создания моделей и их согласования друг с другом, что определяется имеющимися фактическими данными, в частности, информацией о приповерхностном источнике загрязнения, мощности и свойствах отложений ЗА, а также начальных этапах формирования ореола в подземных водах. При наличии этих данных работу целесообразно начинать с разработки модели ЗА, а модель НЗ – согласовывать с ней через граничные условия, как для процессов фильтрации (влагопереноса), так и для миграции.

В противном случае, за основу предпочтительнее брать модель НЗ, в которой массовый поток контаминанта задается в границах проекции источника на уровень грунтовых вод (УГВ) и калибруется по данным мониторинга (рис. 1, 2). Результатом модельных расчетов НЗ является ореол контаминанта в потоке грунтовых вод в реальных концентрациях. Затем разрабатывается модель ЗА, необходимая для оценки ее задерживающих свойств по отношению к загрязнению, поступающему от приповерхностного источника. Мощность ЗА принимается в соответствии с положением УГВ, полученном на модели НЗ. При этом миграционные модели обеих зон не связываются друг с другом граничными условиями.

Расчеты миграции загрязнения в ЗА ведутся в относительных концентрациях. При такой постановке их основной результат – время, на которое отложения ЗА, с одной стороны, задерживают начало поступления контаминанта на УГВ (при активации приповерхностного источника), а с другой, – начало деградации ореола в грунтовых водах (при его ликвидации). В обоих случаях выделяется по два временных интервала (рис. 3а, 3б).

При активации источника интервал t_1^A соответствует времени, когда источник уже функционирует, но поступающие на УГВ концентрации контаминанта не превышают фоновых значений ($C_{\text{фон з.а.}}$), а интервал t_2^A – времени, когда происходит увеличение поступающих концентраций от фоновых до максимальных значений ($C_{\max\ \text{з.а.}}$). После ликвидации источника в течение интервала t_3^A сохраняются максимальные поступающие на УГВ концентрации, а в течение интервала t_4^A они снижаются до фоновых значений.

Для модели НЗ принципиально выделяются те же интервалы времени, что и для модели ЗА (рис. 3в, 3г). При этом важно подчеркнуть, что в данном случае влияние ЗА не учитывается. Интервалы t_1^H и t_2^H связаны с распространением ореола от проекции источника на УГВ до условной наблюдательной скважины, расположенной ниже по потоку, а интервалы t_3^H и t_4^H – с его деградацией при ликвидации этого источника. Аналогичный вид будут иметь графики изменения массового потока контаминанта, поступающего в

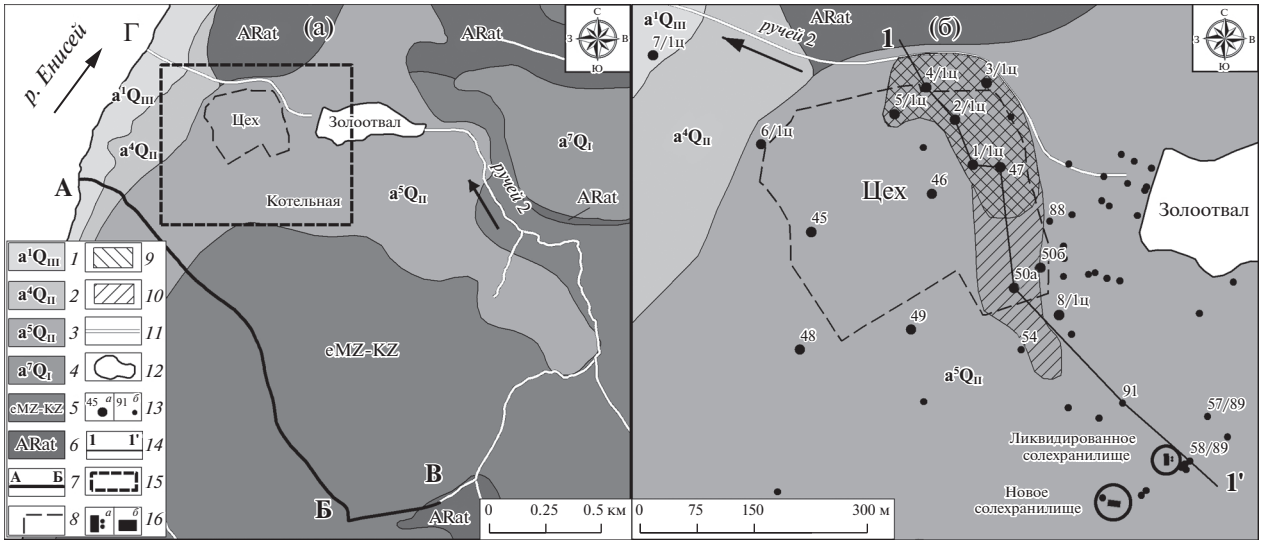


Рис. 1. Геологическая карта территории (а) и карта-врезка (б). 1–4 – аллювиальные отложения надпойменных террас р. Енисей; 5–6 – породы: 5 – мезо-кайнозойской коры выветривания, 6 – архейского возраста; 7 – границы области моделирования (по контуру АБ – непроницаемая граница, по контуру БВ – граница с постоянным напором, по контурам ВГ и АГ – границы по ручью 2 и р. Енисей); 8 – граница площадки цеха; 9–10 – границы зон с повышенными фильтрационными свойствами: 9 – гравийно-галечников в русловой фации аллювия, 10 – песков в коре выветривания; 11 – ручей 2; 12 – золоотвал; 13 – скважины и их номера: *а* – режимные, *б* – прочие; 14 – линия гидрогеологического разреза; 15 – границы карты-врезки; 16 – солехранилище: *а* – ликвидированное, *б* – действующее.

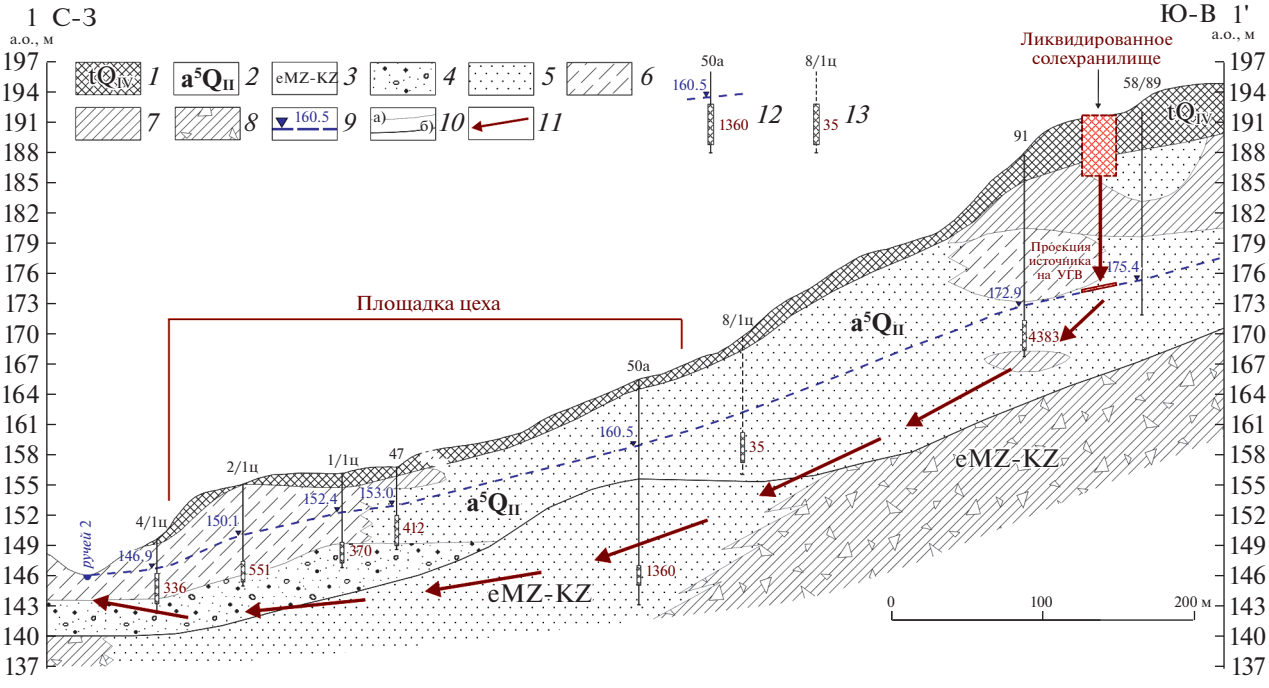


Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез по линии 1–1'. 1 – техногенные отложения; 2 – аллювиальные отложения V надпойменной террасы р. Енисей; 3 – породы мезо-кайнозойской коры выветривания; 4 – гравийно-галечники с песчаным заполнителем; 5 – пески, местами глинистые; 6 – супеси; 7 – суглинки; 8 – выветрелые гнейсы (щебень, дресва, суглинки, супеси); 9 – УГВ, м; 10 – границы: а) литологические, б) стратиграфические; 11 – направление распространения ореола хлорид-иона; 12 – скважина с указанием положения фильтра, вверху – номер, слева – абсолютная отметка УГВ, м, справа – осредненные концентрации хлорид-иона, мг/л; 13 – скважина, снесенная на разрез.

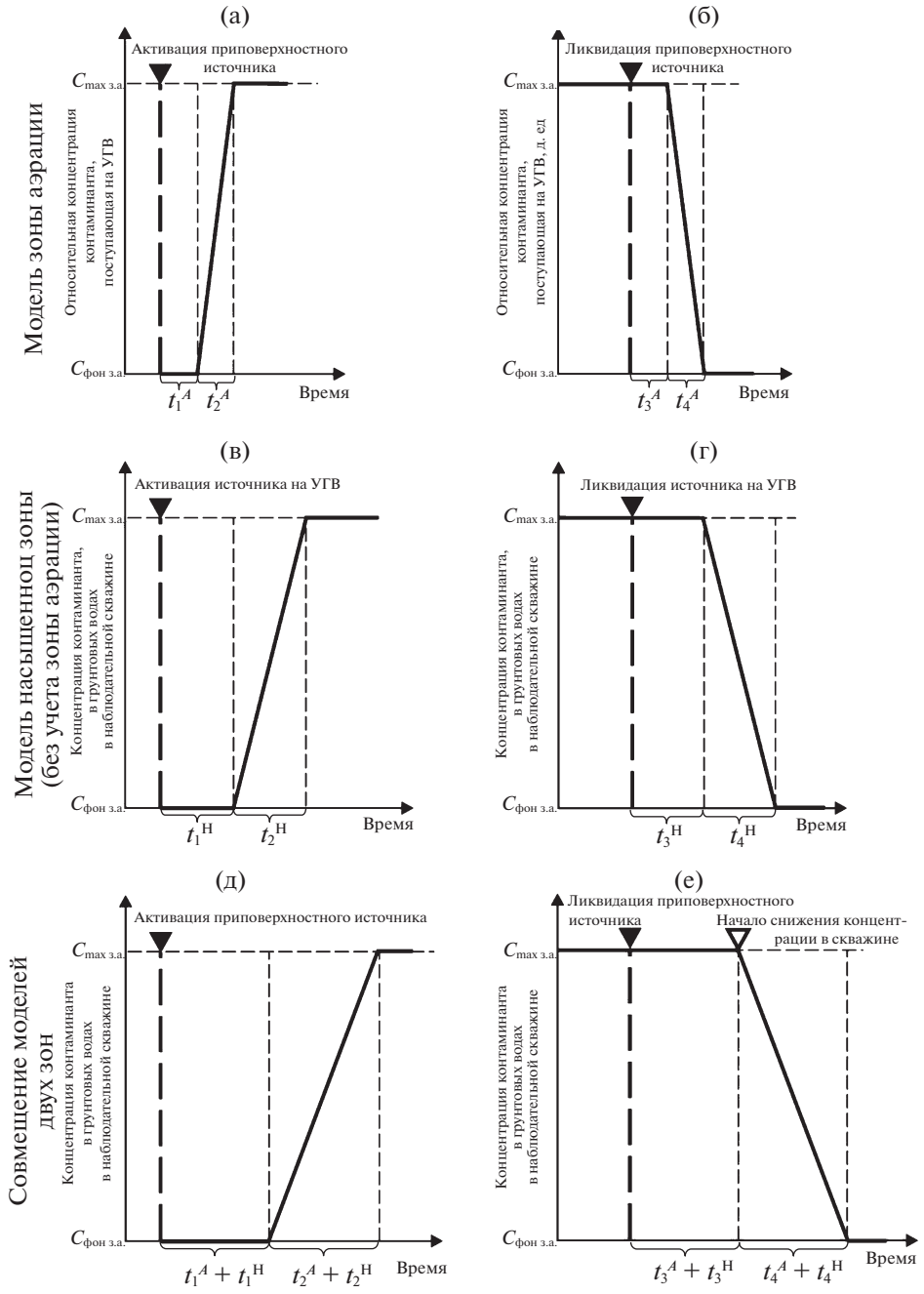


Рис. 3. Схематические графики, иллюстрирующие совместное использование моделей зоны аэрации и насыщенной зоны.

зону разгрузки, на которых также выделяются соответствующие временные интервалы.

Таким образом, зная временные интервалы $t_1^A - t_4^A$, полученные при разработке модели ЗА, и суммируя их с соответствующими интервалами модели НЗ (например, $t_1^H - t_4^H$ – для конкретной наблюдательной скважины), можно провести совместный анализ результатов моделирования обеих зон (рис. 3д, 3е). На представленном далее примере это позволило оценить время начала снижения концентрации контаминанта в наблюдательных скважинах после ликвидации источника с учетом задерживающих свойств отложений ЗА.

В данной работе разработка комплекса моделей начата с НЗ. На основе принятой геофильтрационной схематизации последовательно созданы геологическая, геофильтрационная и геомиграционная модели НЗ в программном комплексе

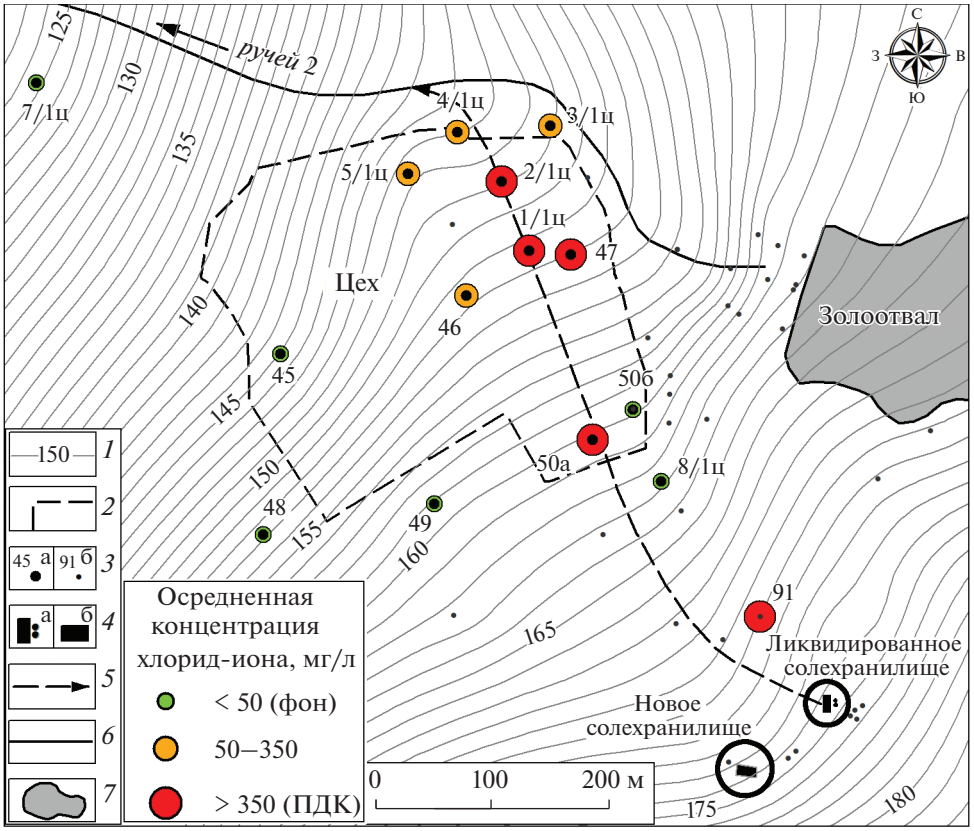


Рис. 4. Схематическая карта гидроизогипс грунтового водоносного комплекса (осредненные данные за период 2016–2019 гг.). 1 – гидроизогипсы с шагом 1 м; 2 – граница площадки цеха; 3 – скважины, использованные при построении карты гидроизогипс, и их номера: а – режимные, б – с разовыми замерами УГВ; 4 – СХ: а – ликвидированное, б – действующее; 5 – направление геофильтрационного потока от ликвидированного СХ; 6 – ручей 2; 7 – золоотвал.

GMS [14]. Комплекс включает в себя инструменты для подготовки исходных данных, разработки геологической модели, а также обработки полученных результатов. Основные модельные расчеты проводятся в GMS с помощью программных кодов MODFLOW-2005 (геофильтрация) и MT3DMS (геомиграция) [9]. Для моделирования влагопереноса и миграции загрязнения в ЗА применена программа HYDRUS-1D [19].

Важно отметить, что разработка большинства моделей имеет итерационный характер, что продемонстрировано в работе [4]. Данный подход чаще применяется для моделей НЗ и позволяет постепенно детализировать отдельные модельные аспекты, в частности связанные со схематизацией фильтрационных неоднородностей [1], получая на каждом этапе более полное их соответствие фактическим данным, но избегая необоснованного усложнения.

Характерная черта математических моделей – значительное число входящих в них параметров. Часть из них можно определить по результатам калибровки модели по данным мониторинга. Оценка ряда других параметров требует проведения дополнительных исследований. В противном случае они принимаются по литературным источникам. В данной работе проведена оценка влияния каждого такого параметра на результаты расчетов. На ее основе в дальнейшем рассмотрено несколько наиболее вероятных (консервативных и более мягких) сценариев с различными наборами параметров.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАССМАТРИВАЕМОГО ОБЪЕКТА И ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

В качестве объекта, на примере которого рассматривается представленная методика, выбрано солехранилище (СХ), которое располагалось на территории предприятия ФГУП “ГХК” и эксплуатировалось с 1967 по 2007 г. (см. рис. 1). Данный объект представлял собой заглубленное на 6 м сооружение из бетонных плит, облицованных изнутри металлом. Приготовление раствора NaCl происходило непосредственно в СХ. В ходе ликвидации оно было промыто и засыпано грунтом до дневной поверхности.

В 2016 г. на площадке цеха, в 300 м к северо-западу от ликвидированного СХ, была организована наблюдательная сеть (рис. 4). Мониторинг со-

Таблица 1. Сравнение модельных и натурных концентраций хлорид-иона в грунтовых водах по скважинам, использованным при калибровке

Наблюдательная скважина	Число замеров концентрации в скважинах, шт.	Концентрация хлорид-иона, мг/л				
		Значение по данным наблюдений за 2016–2019 гг.			Модельное значение при стабилизации ореола (для различных сценариев)	
		Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Максимальное
1/1ц	15	205	376	510	351	411
2/1ц	15	150	551	720	571	626
3/1ц	15	51	102	210	19	28
4/1ц	15	270	336	400	585	632
5/1ц	15	31	58	170	256	325
7/1ц	15	17	48	90	14	107
8/1ц	11	10	35	70	0	25
50а	7	1230	1360	1480	933	1024
50б	15	10	15	40	0	0
47	15	186	412	590	638	757
46	15	28	52	70	8	41
91*	3	3700	4383	5700	856	2407

* – скважина 91 не входит в режимную сеть

стояния грунтовых вод в ряде наблюдательных скважин выявил устойчивые превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) для питьевых вод [6], а также фоновых концентраций по хлорид-иону (350 и 50 мг/л). По данным разовых замеров в скв. 91, не входящей в режимную сеть, концентрации хлорид-иона составляли более 10 ПДК. По схематической карте гидроизогипс, построенной по результатам мониторинга (см. рис. 4), и анализу потенциальных источников хлорид-иона было установлено, что загрязнение поступает от ликвидированного СХ.

Данные мониторинга показывают, что концентрации хлорид-иона в скважинах достаточно стабильны за период наблюдений 2016–2019 гг. (табл. 1). Их снижения вследствие деградации ореола после ликвидации источника к настоящему времени не зафиксировано. Предположительно это связано с тем, что за годы работы СХ в ЗА под ним сформировался вторичный источник загрязнения (зона засоления), который продолжает действовать и в настоящее время. При просачивании атмосферных осадков происходит растворение и вымывание хлоридов из засоленных отложений с их дальнейшим поступлением в грунтовые воды.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Для проведения геофильтрационной схематизации проанализированы данные о геологическом строении территории. Изучаемый район расположен в долине р. Енисей, на ее V надпойменной террасе (см. рис. 1). В основании геологического разреза залегает архейский кристаллический фундамент, представленный гнейсами. На нем развита мезо-кайнозойская площадная кора выветривания, имеющая разнообразный состав и изменчивые фильтрационные свойства (см. рис. 2).

На площадке цеха распространены четвертичные аллювиальные отложения, в которых выделяется нижняя (русловая) и верхняя (пойменная) фации (см. рис. 2). Русловая фация аллювия представлена гравийно-галечниками и песками. Пойменная фация сложена супесями и суглинками. На участке СХ русловая и пойменная фации не выделяются, а разрез аллювиальных отложений представлен чередованием песков, супесей и суглинков.

Гидрогеологические условия изучаемого района характеризуются наличием водоносных горизонтов, приуроченных к аллювиальным отложениям надпойменных террас р. Енисей, а также верхней трещиноватой части метаморфических пород архея. Породы коры выветривания на

большей части территории (за исключением отдельных участков) являются относительным водоупором, поскольку характеризуются низкими коэффициентами фильтрации ($K_Ф$). Соответственно на рассматриваемой территории можно выделить водоносный комплекс грунтовых вод с единой свободной поверхностью и существенно меняющимися мощностью и фильтрационными свойствами водовмещающих пород.

ОЦЕНКА ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ И ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ

Перед разработкой комплекса математических моделей проведена оценка ИП и ЭТ. По фондовым материалам среднемноголетнее ИП, оцененное по модулю подземного стока ручья 2 (см. рис. 1) при допущении полного дренирования грунтового водоносного комплекса, составляет 105–115 мм/год.

Для оценки ИП применен балансовый метод. ЭТ рассчитывалась с помощью зависимости М.И. Будыко [8]. Испаряемость определялась по методу Шуттлевота-Валласа [17] с помощью программы SurfBal [3]. Поверхностный сток, рассчитанный по методу нумерованных кривых стока [8], составил около 55 мм/год. В результате при ЭТ 345–360 мм/год и среднемноголетнем количестве осадков 490 мм/год за период 1967–2018 гг. (по данным метеостанции Опытное поле, г. Красноярск) ИП составило 75–90 мм/год.

В дальнейшем при моделировании рассмотрено два сценария расчетов: со среднемноголетним ИП равным 75 мм/год (2×10^{-4} м/сут) и 110 мм/год (3×10^{-4} м/сут).

РАЗРАБОТКА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ И ГЕОМИГРАЦИОННОЙ МОДЕЛЕЙ НАСЫЩЕННОЙ ЗОНЫ

Модели НЗ охватывают юго-западную часть территории предприятия, на которой расположено ликвидированное СХ (см. рис. 1а). При создании геологической модели геологическое строение района схематизировано четырьмя модельными слоями. Первые два слоя охватывают четвертичные отложения пойменной и русловой фаций (см. рис. 2). К третьему слою относятся породы коры выветривания, к четвертому – породы архея. Мощность последнего слоя, который на V надпойменной террасе не вскрыт, задана 10 м в соответствии с предполагаемой глубиной трещиноватости архейских гнейсов.

На основе геологической модели разработана геофильтрационная модель, которая, в свою очередь, в процессе вычислительной схематизации разбита на 20 расчетных слоев с мощностью ячеек от 0.1 до 2 м. В плане разделение на модельные ячейки проведено с равномерным пространственным шагом 10×10 м. Режим геофильтрационного потока на модели принят стационарным. Границы модели показаны на рис. 1а.

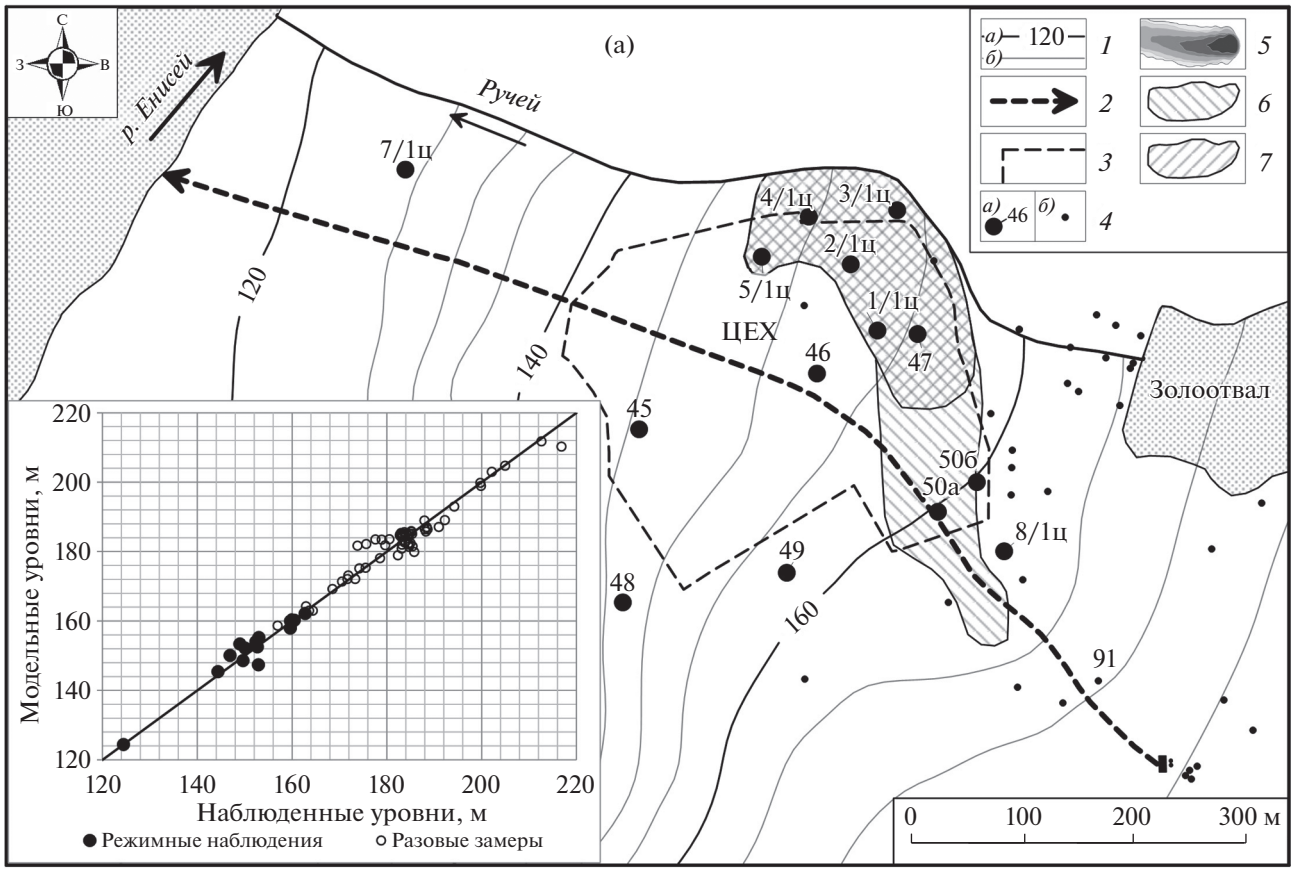
Калибровка геофильтрационной модели проводилась с целью достижения максимальной сходимости модельных и натурных УГВ. Для этого использованы осредненные УГВ 15 наблюдательных скважин за период 2016–2019 гг., а также разовые замеры уровней в 60 скважинах. Калибровка параметров осуществлялась в автоматическом режиме с помощью модуля PEST [11]. В качестве калибруемых параметров выступали $K_Ф$ отложений четырех модельных слоев, а также коэффициенты, характеризующие фильтрационное сопротивление ложа ручья 2 и р. Енисей. $K_Ф$ отложений каждого модельного слоя задавались одинаковыми в пределах области, где фиксируется хлоридное загрязнение.

Процессы испарения и транспирации моделировались с помощью задания максимальной ЭТ со свободной поверхности УГВ при нулевой глубине их залегания. На модели ЭТ задана линейно уменьшающейся до глубины 3 м (критическая глубина, ЭТ = 0). Максимальная ЭТ, как нечувствительный параметр, зафиксирована на уровне 300 мм/год.

Полученный график сопоставления модельных и натурных уровней показан на рис. 5а для сценария с ИП 75 мм/год. Стандартное отклонение модельных уровней от натурных составило 1.57 м.

На основе откалиброванной геофильтрационной модели проведены геомиграционные расчеты. Хлорид-ион рассматривался как нейтральный (несорбируемый, стабильный) контаминант. Учитывались его конвективный перенос с фильтрационным потоком и диффузионно-дисперсионные явления. Расчеты проводились без учета плотностной конвекции, влияние которой, по-видимому, имело место только в непосредственной близости от СХ. Массовый поток хлорид-

Рис. 5. Схематическая карта модельных гидроизогипс грунтового водоносного комплекса территории и графики сопоставления модельных и натурных УГВ для моделей до (а) и после (б) детализации геологического строения. 1 – модельные гидроизогипсы: *а)* – основные, с шагом 20 м, *б)* – дополнительные, с шагом 5 м; 2 – модельное направление геофильтрационного потока от ликвидированного СХ; 3 – граница площадки цеха; 4 – скважины, использованные при построении карты гидроизогипс, и их номера: *а)* режимные, *б)* с разовыми замерами УГВ; 5 – модельный стабильный ореол хлорид-иона; 6–7 – границы зон с повышенными фильтрационными свойствами: 6 – гравийно-галечников в русловой фации аллювия, 7 – песков в коре выветривания.


(а)
С
З
В
Ю
р. Енисей
Ручей
7/1ц
4/1ц
3/1ц
2/1ц
5/1ц
1/1ц
ЦЕХ
46
47
45
50б
50а
8/1ц
49
48
91
120
140
160
Золоотвал
1
2
3
4
5
6
7
0
100
200
300 м
Модельные уровни, м
Наблюденные уровни, м
120
140
160
180
200
220
Режимные наблюдения
Разовые замеры

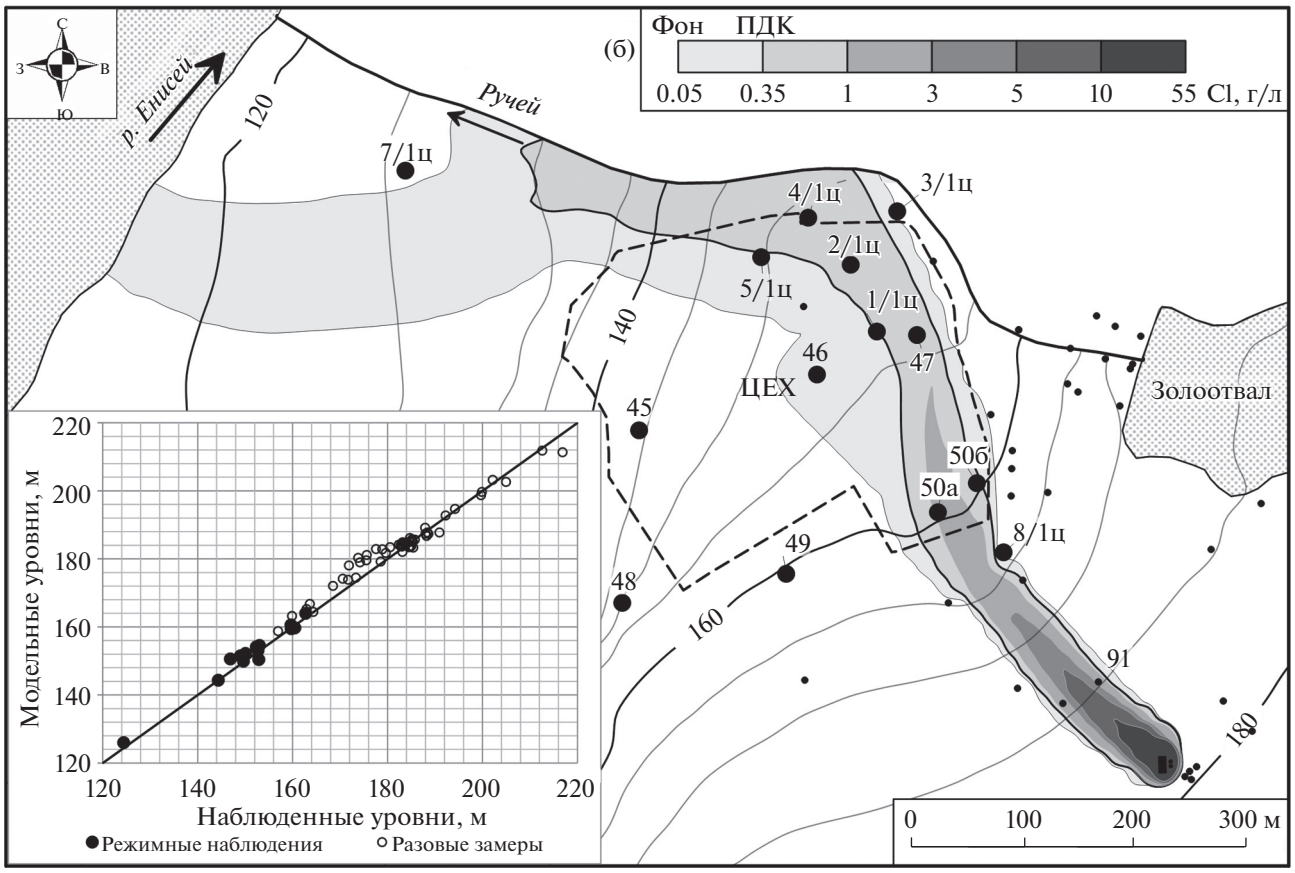

(б)
Фон
ПДК
0.05
0.35
1
3
5
10
55 Cl, г/л
С
З
В
Ю
р. Енисей
Ручей
7/1ц
4/1ц
3/1ц
2/1ц
5/1ц
1/1ц
ЦЕХ
46
47
45
50б
50а
8/1ц
49
48
91
120
140
160
180
Золоотвал
0
100
200
300 м
Модельные уровни, м
Наблюденные уровни, м
120
140
160
180
200
220
Режимные наблюдения
Разовые замеры

Таблица 2. Сценарии расчетов моделей насыщенной зоны и полученные временные интервалы

Сценарий расчета			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Геофильтрационная модель. Инфильтрационное питание, мм/год			75	110	75	75
Геомиграционная модель. Продольная дисперсивность, м/активная пористость, д.ед.	Слой 1	супеси, суглинки	1/0.15		5/0.15	1/0.05
	Слой 2	пески, местами глинистые	1/0.3		5/0.3	1/0.1
		зона гравийно-галечников	1/0.35		0.5/0.35	1/0.3
	Слой 3 (кора выветривания)	породы без разделения	1/0.15		5/0.15	1/0.05
		зона песков	1/0.3		1/0.3	1/0.1
	Слой 4	трещиноватые гнейсы	1/0.03		10/0.03	1/0.01
Временные интервалы для наблюдательных скважин, лет (скв. № 50а/№ 5/1ц)	$t_1^{\text{Н}}$		3/6	3/5	3/6	1/2
	t_2^{H}		7/7	4/6	8/8	2/2
	t_3^{H}		3/6	3/5	3/6	1/2
	t_4^{H}		4/5	3/3	5/6	2/2
Временные интервалы для зоны разгрузки в поверхностные воды, лет	t_1^{P}		6	5	6	2
	t_2^{P}		13	13	15	6
	t_3^{P}		6	5	5	2
	t_4^{P}		15	10	16	6

иона задавался в границах проекции источника на УГВ (см. рис. 2) с начала эксплуатации СХ (1967 г.) и калибровался по данным мониторинга.

В процессе геомиграционных расчетов проведена верификация результатов калибровки геофильтрационной модели по данным мониторинга концентраций хлорид-иона в грунтовых водах. Она показала, что направление распространения модельного ореола контаминанта в потоке грунтовых вод не согласуется с данными мониторинга (см. рис. 4, 5а), несмотря на хорошую сходимость модельных и натурных УГВ. В связи с этим возникла необходимость возврата к этапу разработки геологической модели с целью выявления эффективной фильтрационной неоднородности геологической среды [1], определяющей направление распространения ореола загрязнения.

Переинтерпретация данных геологического строения. Дополнительный анализ карты гидроизогипс (см. рис. 4) позволил выявить область с недостаточной детализацией геологического строения, признаком которой была смена направления потока с северо-западного на участке СХ на преимущественно северное на площадке цеха, а также падение его градиента. Такие изменения в структуре потока оказались связаны с наличием двух зон повышенной проницаемости в северо-восточной части площадки цеха (см. рис. 1б, 2), которые были оконтурены по данным бурения. Одна зона, сложенная гравийно-галечниками, выделена в русловой фации аллювия (во 2-м слое геологической модели). Другая зона, представленная гнейсами выветрелыми до песков, выделена в толще слабопроницаемых пород коры выветривания (в 3-м слое) по двум скважинам (5/1ц и 50а). Контуры зоны песков в коре выветривания, а также их мощность подбирались в ходе калибровки направления потока грунтовых вод на участке распространения ореола.

Результаты калибровки геофильтрационной модели после детализации геологического строения представлены на рис. 5б (сценарий с ИП 75 мм/год). Стандартное отклонение модельных уровней от натурных составило 1.55 м, что практически идентично величине, полученной на геофильтрационной модели без детализации, но при этом локальные различия в структуре потока грунтовых вод в двух вариантах являются значимыми по отношению к направлению миграции хлорид-иона (см. рис. 5).

По результатам комплексного анализа фактических данных и проведенного геомиграционного моделирования важно отметить, что ореол хлорид-иона за счет наличия фильтрационных неоднородностей меняет направление распространения, как в плане, так и в разрезе, мигрируя преимущественно в наиболее проницаемых отложениях (см. рис. 2, 5).

Для оценки чувствительности модельных параметров проведены расчеты по нескольким сценариям геофильтрационной и геомиграционной моделей (табл. 2). В качестве параметров рассмот-

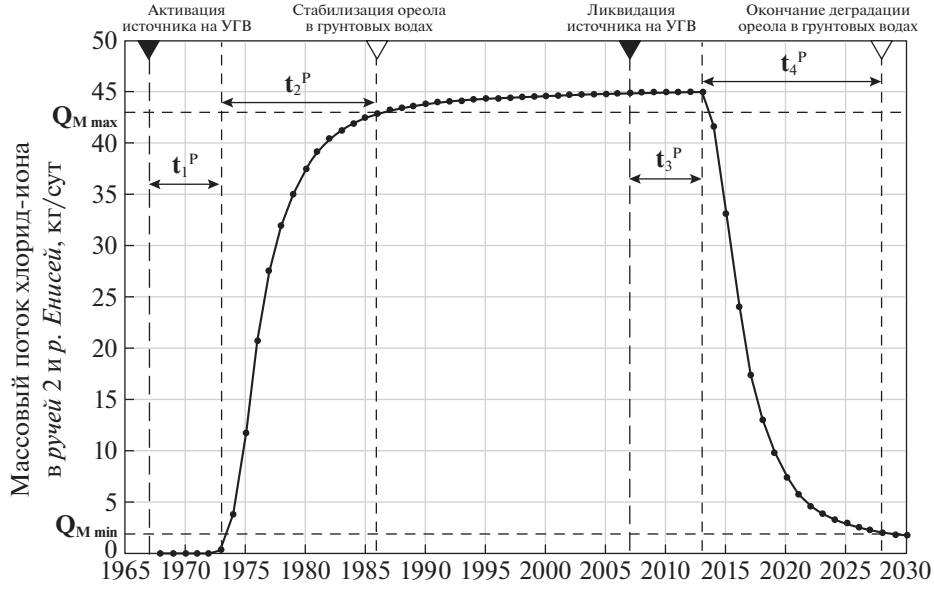


Рис. 6. Модельный график поступления хлорид-иона в поверхностные воды (модель насыщенной зоны, сценарий 1).

рены ИП, продольная дисперсивность (δ_L) и активная пористость отложений (n_a). Поперечная дисперсивность задана на порядок меньше продольной.

Увеличение ИП с 75 до 110 мм/год вызвало рост $K_Ф$ отложений в связи с необходимостью сохранения сходимости модельных и натурных уровней в скважинах, а также рост массового потока хлорид-иона от источника загрязнения (с 25 до 30 кг/сут). В соответствии с этим увеличился и максимальный массовый поток контаминанта (с 45 до 55 кг/сут), который поступает в зону разгрузки (ручей 2 и р. Енисей) после стабилизации ореола.

Кроме того, увеличение ИП привело к небольшому ускорению миграции загрязнения в грунтовых водах (см. табл. 2, сценарии 1 и 2), с чем связано уменьшение временных интервалов, выделяемых на графиках изменения концентрации контаминанта в скважинах ($t_1^H - t_4^H$). Для каждого интервала по наблюдательным скважинам даны два значения: для ближайшей к источнику скважины и наиболее удаленной от него.

В табл. 2 также приведены интервалы $t_1^P - t_4^P$, выделяемые на графиках массового потока хлорид-иона, поступающего в поверхностные воды. Пример такого графика для сценария 1 показан на рис. 6. Критерии выделения интервалов определяются экспертным путем. В представленном примере момент стабилизации ореола в грунтовых водах, соответствующий концу интервала t_2^P, выделен, когда массовый поток контаминанта достигает максимальных значений ($Q_{M\,max}$) с относительной погрешностью не более 5%. Окончание деградации ореола (конец интервала t_4^P) соответствует снижению массового потока хлорид-иона до минимальных значений ($Q_{M\,min}$), дающих прирост концентрации контаминанта в ручье 2 на два порядка ниже фона.

Оценка влияния δ_L проводилась для двух сценариев (см. табл. 2). В сценарии 1 параметр задан осредненным для всех отложений (1 м), а в сценарии 3 он варьируется от 0.5 до 10 м в зависимости от типа отложений. Указанный диапазон параметра принят согласно [12] с учетом размеров ореола хлорид-иона от СХ до областей разгрузки, который составляет около 600–1100 м. При этом большие значения δ_L относятся к отложениям с большей глинистостью, для которых характерны более сложные пути миграции загрязнения.

Сравнение двух сценариев показало, что параметр δ_L влияет на результаты незначительно. Для сценария 3 заметно чуть более активное рассеивание ореола хлорид-иона в потоке грунтовых вод, что привело к увеличению на 1–2 года временных интервалов, отвечающих за рост и снижение его концентраций в скважинах (t_2^H, t_4^H) и массового потока в зоне разгрузки (t_2^P, t_4^P).

Вариации δ_L и ИП не оказывают значительного влияния на откалиброванные модельные концентрации хлорид-иона в наблюдательных скважинах (см. табл. 1).

Для оценки влияния n_a выбраны значения, характерные для соответствующих типов отложений [1]: максимальные (сценарий 1) и минимальные (сценарий 4) (см. табл. 2). Результаты расче-

Таблица 3. Характеристики пород зоны аэрации и параметры уравнения Ван Генухтена

Тип пород зоны аэрации			Пески	Супеси	Суглинки
Гранулометрический состав в %, размер частиц в мм	Пески (>0.05)		–	–	5–15
	Алевриты (0.002–0.05)		–	–	70–80
	Глины (<0.002)		–	3–7	10–15
Плотность сухого грунта, кг/м^3			1520–1800	1600–1700	
Полевая влагоемкость, %			5–9	11–18	18–22
Параметры уравнения Ван Генухтена	Влажность, %	остаточная (θ_r)	2.4	2.7	3.8
		полная (θ_s)	28	29.2	32.9
	Коэффициент фильтрации при полном водонасыщении, м/сут		1.5	0.5	0.09
	Эмпирические параметры	α, 1/м	6.8	4	2.3
		n, (–)	1.4	1.3	1.32

тов показали, что изменение n_a существенно влияет на скорость распространения ореола в грунтовых водах (см. табл. 2). При минимальной n_a ореол хлорид-иона быстрее достигает области разгрузки, при ликвидации источника – быстрее деградирует. В результате в первом случае сценарий 4 можно считать консервативным, а во втором – мягким.

Важно отметить, что при продолжении мониторинга в скважинах поочередно будет зафиксирован спад концентраций хлорид-иона за счет деградации ореола, что позволит откалибровать n_a. Уточненные параметры можно будет использовать, как для расчетов распространения загрязнения от нового СХ, расположенного в 100 м к юго-западу от ликвидированного (см. рис. 1), так и при моделировании распространения других видов загрязнения в пределах рассматриваемой области.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ВЛАГОПЕРЕНОСА И МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Наблюдения за содержанием хлорид-иона в грунтовых водах начались только с 2016 г., когда ореол контаминанта уже стабилизировался. Вследствие этого при расчетах принят консервативный сценарий, в котором моделирование миграции хлорид-иона в ЗА при активации источника не проводилось, а временные интервалы t_1^A и t_2^A равны нулю (см. рис. 3а).

После ликвидации СХ в 2007 г. из сформировавшейся зоны засоления под первичным источником началось вымывание хлорид-иона атмосферными осадками. Таким образом, для моделей ЗА целью расчетов была оценка времени действия вторичного источника (см. рис. 3б). При этом консервативным сценарием принимался такой, в котором временные интервалы t_3^A и t_4^A максимальны.

По данным бурения на участке размещения СХ (см. рис. 2) ЗА представлена чередованием суглинков, супесей и песков. При моделировании для упрощения разрез принят однородным, но рассмотрены сценарии с разным составом отложений. Мощность ЗА принята равной 14 м по результатам геофильтрационного моделирования НЗ.

При расчетах влагопереноса для связи высоты всасывания, объемной влажности пород и коэффициента влагопереноса использованы зависимости Ван Генухтена-Муалема [13, 15]. Для получения параметров уравнения Ван Генухтена, к которым относятся остаточная и полная объемная влажность пород (θ_r и θ_s), а также эмпирические параметры (α и n), на основе известных характеристик пород (табл. 3) использована программа Rosetta [16], интегрированная в программу HYDRUS-1D.

На модели влагопереноса на верхней границе задано среднемноголетнее ИП, на нижней – постоянная высота всасывания (0 м), что соответствует УГВ. По результатам моделирования влагопереноса получены стационарные распределения влажности отложений, которые затем использованы для геомиграционных расчетов. Моделирование миграции проводилось с учетом рассеивания вещества за счет диффузии и дисперсии. При расчетах использована относительная концентрация хлорид-иона. Вторичный источник (зона засоления) задан в виде начальных концентраций (1 д.ед.) контаминанта в поровой воде отложений ЗА. Процессы растворения соли при просачивании атмосферных осадков не рассматривались.

Таблица 4. Сценарии расчетов моделей зоны аэрации и полученные временные интервалы

Сценарий расчета		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Модель влагопереноса	Состав отложений	супеси	суглинки	пески	супеси	супеси	суглинки	суглинки	суглинки
	Мощность, м	14	14	14	14	14	14	14	16.5
	Инфильтрационное питание, мм/год	75	75	75	75	110	75	110	75
Геомиграционная модель. Продольная дисперсивность, м		1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Временные интервалы, лет	t_3^A	5	6	8	11	8	15	10	21
	t_4^A	65	84	14	20	13	25	17	27
Соответствие результатов моделирования данным наблюдений		нет	нет	нет	да	нет	да	да	да

При схематизации вторичного источника учтено, что СХ в ходе ликвидации засыпано чистым грунтом. В результате принято, что зона засоления распространяется под ликвидированным СХ на всю глубину ЗА. Принятое допущение обосновано долгим сроком работы СХ (40 лет) и высокими коррозионными свойствами NaCl по отношению к его металлической внутренней облицовке. Кроме того, оно проверено в ходе предварительных расчетов, которые показали, что для засоления всей мощности ЗА за время эксплуатации СХ минимальные фильтрационные потери рассола из него должны были составлять около 0.1 л/сут с каждого квадратного метра площади хранилища.

На геомиграционной модели рассмотрено несколько сценариев (табл. 4), в которых оценено влияние состава отложений ЗА, ее мощности, ИП, $K_Ф$ отложений и δ_L. Влияние состава отложений ЗА учитывалось при изменении параметров уравнения Ван Генухтена согласно табл. 3.

Также принято во внимание, что после ликвидации источника в 2007 г. по данным мониторинга снижения концентраций хлорид-иона в скважинах по состоянию на 2019 г. не зафиксировано. Из этого, согласно рис. 3*е*, можно записать неравенство

$$t_3^H + t_3^A \geq 12 \text{ лет}.$$

При t_3^H для ближайшей наблюдательной скв. 50а равном от 1 до 3 лет (см. табл. 2) можно оценить минимальное значение t_3^A, которое составит 9 лет.

В ходе оценки чувствительности параметров выявлено, что наиболее важным из них является δ_L. Он оценен согласно [12] в диапазоне от 0.1 до 1 м с учетом мощности ЗА, отвечающей длине пути миграции хлорид-иона. Сценарии 1 и 2 при δ_L равном 1 м оказались нереалистичными, поскольку интервал t_3^A был менее 9 лет (см. табл. 4). При минимальном δ_L (0.1 м) для ЗА, сложенной песками, снижение концентраций хлорид-иона в скважинах должно было уже начаться (см. сценарий 3, табл. 4). На основе этого можно заключить, что в ЗА под ликвидированным СХ преобладают суглинки и супеси, а δ_L близка к 0.1 м.

Следующие сценарии (4–7) показали, что ИП менее чувствительный параметр и может меняться от 75 до 110 мм/год. Возможные вариации $K_Ф$ отложений не оказали существенного влияния на результаты (в табл. 4 не показаны). В качестве консервативного рассмотрен сценарий 8 с суглинистым составом ЗА, ее максимальной мощностью (16.5 м) согласно разовым замерам УГВ в скв. 58/89 (см. рис. 2) и минимальным ИП. Результаты показали, что в таком случае интервал t_3^A составит 21 год.

Таким образом, по результатам рассмотренных сценариев интервалы t_3^A и t_4^A для миграции загрязнения в ЗА оценены в диапазонах 10–21 и 17–27 лет. Окончание интервала t_4^A (см. рис. 3б) принято по снижению относительной концентрации, поступающей на УГВ, до 0.1% от начальной в зоне засоления.

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ ХЛОРИД-ИОНА В НАСЫЩЕННОЙ ЗОНЕ И ЗОНЕ АЭРАЦИИ

Для первого этапа миграции хлорид-иона (от активации источника в 1967 г. до стабилизации его ореола в грунтовых водах) задерживающие свойства ЗА не учитывались. При возможной вариативности параметров модели НЗ стабилизация ореола произошла в период с 1975 г. (консервативный сценарий) по 1988 г. (мягкий сценарий). При стабилизации ореола хлорид-ион

поступал в поверхностные воды в значениях близких к максимальным (45–55 кг/сут).

Для второго этапа миграции контаминанта (от ликвидации источника в 2007 г. до окончания деградации ореола в грунтовых водах) учитывались результаты расчетов моделей обеих зон. Консервативным в этом случае можно считать сценарий с минимальным ИП, максимальной n_a (сценарий 1, табл. 2) и ЗА максимальной мощности, сложенной суглинками (сценарий 8, табл. 4). В этом случае деградация ореола в грунтовых водах начнется с 2028 г., а снижение концентраций хлорид-иона в наблюдательных скважинах – с 2031–2034 гг. Окончание деградации ореола, соответствующее снижению поступления хлорид-иона в поверхностные воды до минимальных значений ($Q_{M\ min}$) (см. рис. 6), произойдет после ликвидации источника через время $t_3^A + t_3^P + t_4^A + t_4^P$, т.е. ориентировочно к 2076 г. По мягкому сценарию деградация ореола происходит с 2017 г. С 2020 г. она проявится началом снижения концентраций в скважинах, а окончательно завершится к 2042 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика создания комплекса математических моделей ЗА и НЗ дает возможность проследить в различных сценариях миграцию загрязнения от приповерхностного источника до областей разгрузки. Методика показала свою эффективность в условиях неполноты фактических данных, что объективно затрудняет разработку моделей ЗА и их согласование с моделями НЗ.

В рассмотренном примере миграционные модели каждой зоны разрабатывались независимо друг от друга. При появлении новых данных это дает преимущество относительно быстрой корректировки, как сценариев расчетов, так и получаемых на их основе прогнозов.

Оценка чувствительности параметров моделей обеих зон, с одной стороны, выявила наиболее значимые из них, нуждающиеся в уточнении в ходе проведения дополнительных исследований, а с другой, – позволила определить вариативность получаемых результатов моделирования. Помимо решения рассмотренной задачи, разработанный комплекс моделей может быть использован при расчетах миграции других контаминантов от иных источников загрязнения, размещенных на данной территории.

На представленном примере также показана важность использования данных о концентрациях загрязнения в грунтовых водах при калибровке и верификации модели. Калибровка модели только по уровням, с одной стороны, упрощает процесс моделирования, но с другой, – не дает возможности выявить элементы геофильтрационной неоднородности, масштабы которых сопоставимы с размерами ореола и существенно влияют на направление миграции и структуру ореола загрязнения. Использование данных о распространении загрязнения в совокупности с уровнями грунтовых вод позволяет в ходе итерационной корректировки фильтрационной схематизации обоснованно детализировать модель, получив при ее минимальном усложнении максимальное соответствие модельных и натурных данных, а также наиболее точные значения параметров и результаты прогнозных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гавич И.К.* Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988. 349 с.
2. *Гольдберг В.М., Газда С.* Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
3. *Гриневский С.О., Поздняков С.П.* Ретроспективный анализ влияния климатических изменений на формирование ресурсов подземных вод // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2017. № 2. С. 42–50.
4. *Паничкин В.Ю.* Геоинформационно-математическое моделирование гидрогеологических систем Казахстана: автореф. дисс. докт. техн. наук. Алматы, 2000. 47 с.
5. *Румынин В.Г.* Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
6. СанПиН 2.1.4.1074-01. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. М.: Минздрав России, 2002. 67 с.
7. *Шестаков В.М.* Гидрогеодинамика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 368 с.
8. *Шестаков В.М., Поздняков С.П.* Геогидрология. М.: ИКЦ “АКАДЕМКНИГА”, 2003. 176 с.
9. *Chiang Wen-Hsing.* 3D-groundwater modeling with PMWIN: a simulation system for modeling groundwater flow and transport processes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 397 p.
10. COMSOL Multiphysics: User Manuals. URL: https://doc.comsol.com (дата просмотра 25.05.2021).
11. *Doherty J.E., Hunt R.J.* Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5169, 2010. 59 p.
12. *Fitts C.R.* Groundwater Science. San Diego, California, Academic Press, 2002. 450 p.
13. *Van Genuchten M.T.* A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils // Soil Science Society of America Journal. 1980. V. 44. P. 892–898.
14. GMS: User Manuals. URL: https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:User_Manuals (дата просмотра 13.03.2021).

15. *Mualem Y.* A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media // Water Resources Research. 1976. V. 12. P. 513–522.
16. *Schaap M.G., Leij F.L., van Genuchten M.T.* Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // J. Hydrology. 2001. V. 251. P. 163–176.
17. *Shuttleworth W.J., Wallace J.S.* Evaporation from sparse crops-an energy combination theory // Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 1985. V. 3. P. 839–855.
18. *Šimůnek J., van Genuchten M.T., Šejna M.* The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical manual. Version 3.0. Riverside, California, Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2012. 260 p.
19. *Šimůnek J., Šejna M., van Genuchten M.T. et al.* The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Technical manual. Version 3.0. Riverside, California, Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2013. 340 p.

DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL SET FOR UNSATURATED AND SATURATED ZONES FOR PREDICTING CONTAMINANT TRANSPORT FROM A NEAR-SURFACE SOURCE TO A DISCHARGE AREA

E. V. Kononchenko[a,#] and A. B. Petrash[a,##]

[a] *FSBI "Gidrospetzgeologiya", ul. Marshala Rybalko 4, Moscow, 123060 Russia*
[#] *E-mail: lena.konon@mail.ru*
[##] *E-mail: A.B.Petrash@yandex.ru*

The paper describes the development procedure of the model set for unsaturated and saturated zones. These models permit characterizing quantitatively the solute transport from a near-surface source to the groundwater table and a discharge area. The method application has been considered by the example of the area showing chloride groundwater contamination. A salt storage site having been in operation in the period of 1967–2007 serves as a source of pollution. In 2016, a network of monitoring wells was installed at a distance of 300 m to the northwest of the storage site. According to observations, the permanent excess in chloride concentrations in groundwater over the threshold for drinking water has been registered. At present, no decrease in contaminant concentrations after the removal of the contamination source is observed. That is probably connected with the developing of the secondary contamination source (salinization zone) in the unsaturated zone. The models for the unsaturated and saturated zones have been developed for this investigation site. The saturated zone model has been calibrated on the basis of monitoring data that include groundwater table levels and chloride concentrations. A chloride plume in the groundwater flow has been simulated in absolute concentrations. Solute transport in the unsaturated zone has been calculated in relative concentrations. Based on the simulation results, the time intervals have been defined that characterize the steps of contamination plume formation during the salt storage use, as well as the steps of its degradation after its the salt storage removal. Sensitivity analysis of both zones model parameters has been made and the most important of them have been identified. As a result of sensitivity analysis, a number of model scenarios (both conservative and softer) have been considered in order to study the variability of model forecasts. Proceeding from the complex model retrospective calculations and monitoring data, the more accurate parameters have been obtained for the properties of unsaturated zone sediments.

Keywords: *numerical modeling*, *unsaturated and saturated zones*, *groundwater*, *solute transport model*

REFERENCES

1. Gavich, I.K. *Gidrogeodinamika* [Groundwater flow]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 349 p. (in Russian)
2. Gol'dberg, V.M., Gazda, S. *Gidrogeologicheskie osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Hydrogeological fundamentals of groundwater protection from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 262 p. (in Russian)
3. Grinevskii, S.O., Pozdnyakov, S.P. *Retrospektivnyi analiz vliyaniya klimaticheskikh izmenenii na formirovanie resursov podzemnykh vod* [Retrospective analysis of the climate change impact on groundwater resources]. *Vestnik MGU*, *Seriya* 4, *Geologiya*, 2017, no. 2, pp. 42–50. (in Russian)
4. Panichkin, V.Yu. *Geoinformatsionno-matematicheskoe modelirovanie gidrogeologicheskikh sistem Kazakhstana* [Geoinformation and mathematical modelling of Kazakhstan hydrogeological systems]. Extended abstract of doctoral (Techn. Sci.) dissertation. Almaty, 2000, 47 p. (in Russian)
5. Rumynin, V.G. *Geomigratsionnye modeli v gidrogeologii* [Subsurface solute transport models with application to groundwater hydrology]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011, 1158 p. (in Russian)

6. *SanPiN 2.1.4.1074-01. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy. Pit'evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pit'evogo vodosnabzheniya* [SanPiN 2.1.4.1074-01. Sanitary and epidemiological rules and regulations. Drinking water.Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems]. Moscow, Ministry of Heath Care of Russia, 2002, 67 p. (in Russian)
7. Shestakov, V.M. *Gidrogeodinamika* [Groundwater flow]. Moscow, MSU Publ., 1995, 368 p. (in Russian)
8. Shestakov, V.M., Pozdnyakov, S.P. *Geogidrologiya* [Geohydrology]. Moscow, AKADEMKNIGA Publ., 2003, 176 p. (in Russian)
9. Chiang, Wen-Hsing, 3D-groundwater modeling with PMWIN: a simulation system for modeling groundwater flow and transport processes. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2005, 397 p.
10. COMSOL multiphysics: user manuals. Available at: https://doc.comsol.com (accessed 25.05.2021).
11. Doherty, J.E. and Hunt, R.J. Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5169, 2010, 59 p.
12. Fitts, C.R. Groundwater science. San Diego, California, Academic Press, 2002. 450 p.
13. Van Genuchten, M.T. A Closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, vol. 44, pp. 892–898.
14. GMS: User manuals. Available at: https://www.xmswiki.com/wiki/GMS:User_Manuals (accessed 13.03.2021).
15. Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 1976, vol. 12, pp. 513–522.
16. Schaap, M.G., Leij, F.L. and van Genuchten, M.T. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrology*, 2001, vol. 251, pp. 163–176.
17. Shuttleworth, W.J. and Wallace, J.S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.,* 1985, vol. 3, pp. 839–855.
18. Šimůnek, J., van Genuchten, M.T., Šejna, M. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical manual. Version 3.0. Riverside, California, Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2012, 260 p.
19. Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M.T. et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual. Version 4.16. Riverside, California, Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2013, 340 p.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 87–93

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.837: 553.41:553.068.4: 622.2

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗОН ПОДРАБОТОК ДАЕК БЕРЕЗИТОВ

© 2021 г. А. В. Кузин[1,*], Э. Х. Гадельшина[1], И. О. Борисов[1]

[1] *Уральский государственный горный университет, ул. Куйбышева, д. 30, Екатеринбург, 620144 Россия*

**E-mail: kuzin-av@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.04.2021 г.
После доработки 20.05.2021 г.
Принята к публикации 11.06.2021 г.

Исследована информативность и разрешающая способность геофизических методов электроразведки, гравиразведки, магниторазведки, сейсморазведки, радиометрии при исследовании зон старательских подработок березитовых золотоносных даек и кварцевых жил. Наиболее эффективна при решении изыскательских задач электроразведка методами сопротивлений, малоглубинная сейсморазведка. Поиск старательских выработок размером в первые метры в пределах золотоносных объектов возможен, если глубина до них не превышает 2–3 размера их сечения. Сеть измерений при этом должна быть соизмерима с размерами искомых объектов.

Ключевые слова: *инженерная геофизика*, *зоны подработки*

DOI: 10.31857/S0869780921050088

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании строительства сооружений над зонами возможных подработок золотоносных даек березитов и кварцевых жил применение геофизических исследований в составе инженерно-геологических обязательно[1]. Маркшейдерская служба рудников не всегда располагает сведениями о старательских приповерхностных выработках, пройденных в XVIII – начале XX веков. Такая ситуация наблюдается, в частности, на Среднем Урале на старейшем золоторудном Березовском месторождении [1, 3].

Задачи перед геофизическими исследованиями следующие: определение мощности рыхлых делювиально-элювиальных образований, поиск в толще коренных пород даек березитов (березитизированных гранит-порфиров), кварцевых жил, обнаружение в них старательских выработок (шахт, дудок, штолен, карьеров) глубиной в единицы–первые десятки метров, которые чаще всего после отработки заполнялись рыхлыми глинистыми грунтами, но могут быть заполненными грунтовой водой или оставаться полыми. Глубина исследований, как правило, не превышает 8–20 м.

Для решения вышеуказанных задач геофизическими методами существуют благоприятные геологические и петрофизические предпосылки. Искомые объекты – дайки березитов и кварцевые жилы – чаще всего имеют субвертикальное залегание, резкие границы с вмещающими их базальтами, андезитами, хлоритовыми сланцами, серпентинитами [1, 3, 5]. Физические свойства рыхлых и скальных пород верхней части разреза различны, что дает возможность изучать геофизическими методами их литологический состав и структурные взаимоотношения. Таблица физических свойств этих пород на Березовском рудном поле приведена авторами ранее [4, 5], потому укажем их типичные значения лишь в тексте при описании применения различных геофизических методов для решения инженерных задач.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На одном из участков изысканий с известными дайками мощностью около 10 м известной по бурению мощностью рыхлых образований проведены комплексные геофизические исследования методами электроразведки, магниторазведки, гравиразведки. Поэтому есть возможность сравнить информативность применяемых методов. Применение этих же методов на других участках, а также метода малоглубинной сейсморазведки и радиометрии позволяет оценить эффективность

[1] СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 4. Правила производства инженерно-геологических изысканий в районах с особыми природно-техногенными условиями. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200032526

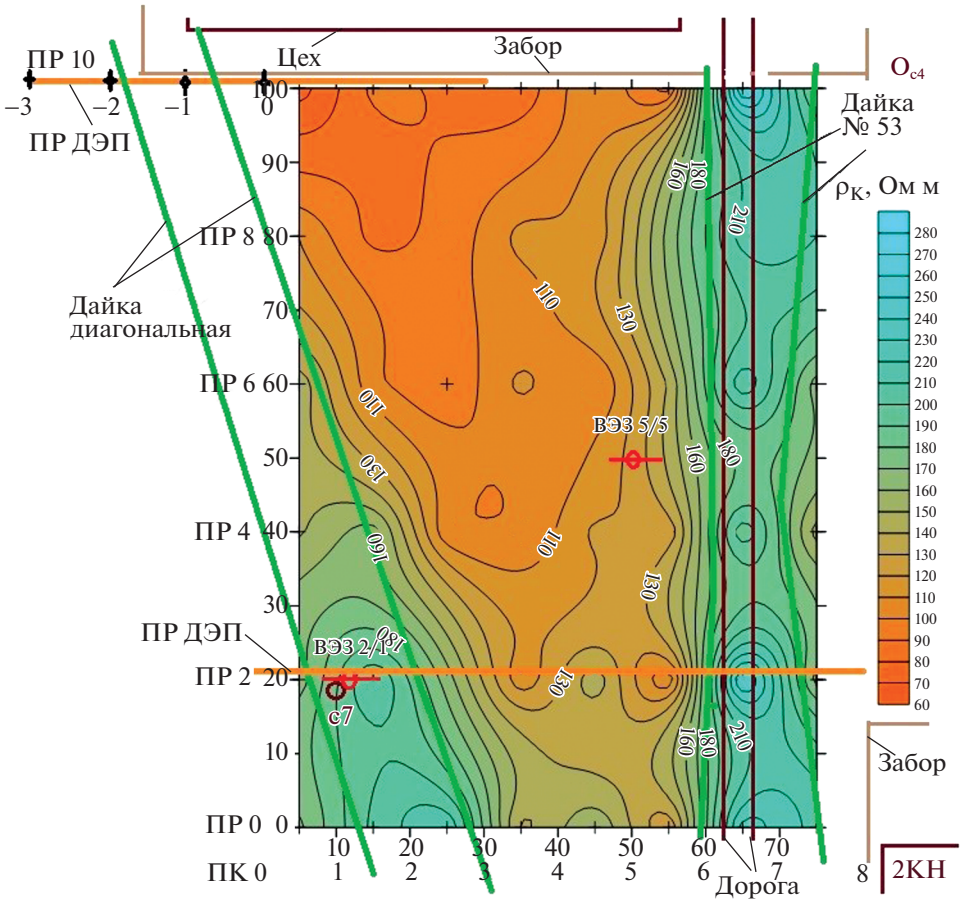


Рис. 1. План значений кажущегося удельного электрического сопротивления на глубине порядка 20–25 м по данным планшета МСГ. Указано положение даек березитов, точки ВЭЗ, скважины и некоторые сооружения.

всех этих геофизических методов более объективно.

На рис. 1 приведен план значений кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород на глубине порядка 20–25 м. Он составлен по данным съемки планшета методом срединного градиента (МСГ) размером 100 × 80 м по сети 20 × 10 м. Разнос питающей линии составлял 220 м. Участок располагается в юго-восточной части Березовского. Значения кажущегося УЭС изменяются в диапазоне 60–280 Ом м. Это указывает степень выветривания скальных пород до состояния щебенисто-глинистого агрегата. Для условий Березовского рудного поля такая степень выветривания скальных на исследуемой глубине типична [4, 5]. По данным ВЭЗ № 5/5, мощность делювиальных суглинков в 10 м к западу от дайки № 53 достигает 16 м. К востоку от нее в 30–80 м – по данным Березовского рудника – до 12–16 м.

Значения кажущегося УЭС порядка 70–130 Ом м на планшете МСГ характеризуют распространение в разрезе выветренных базальтов [1, 3].

Дайки березитов Диагональная II и № 53 проявляются линейными зонами повышения кажущегося УЭС до 180–280 Ом м. По данным Березовского рудника, они не подвергались разработке. Верхняя кромка дайки Диагональная II скважиной № 7 вскрыта на глубине 8.5 м. В керне виден щебень светло-зеленых каолинизированных березитов с прожилками кварца, вкрапленностью кубических кристаллов сульфидов размером 2–4 мм, фактически это метаморфозы лимонита по пириту. По кривой ВЭЗ № 2/1, снятой вблизи скважины, кровля выветренных березитов с УЭС 138 Ом м залегает на глубине 7.8 м, кровля более прочных скальных березитов – на глубине 12.6 м, их УЭС достигает 206 Ом м.

Нерасчлененный по геоэлектрическим данным ВЭЗ № 2/1 слой рыхлых делювиальных и элювиальных суглинков светло-бурого, желтого цветов обладает УЭС порядка 35 Ом м. Это значение в полтора-два раза выше, чем УЭС бурых суглинков по базальтам в других частях исследованной точками ВЭЗ площади. Это обусловлено тем, что над дайками березитов, кварцевых жил в составе рыхлых присутствуют вторичные минералы

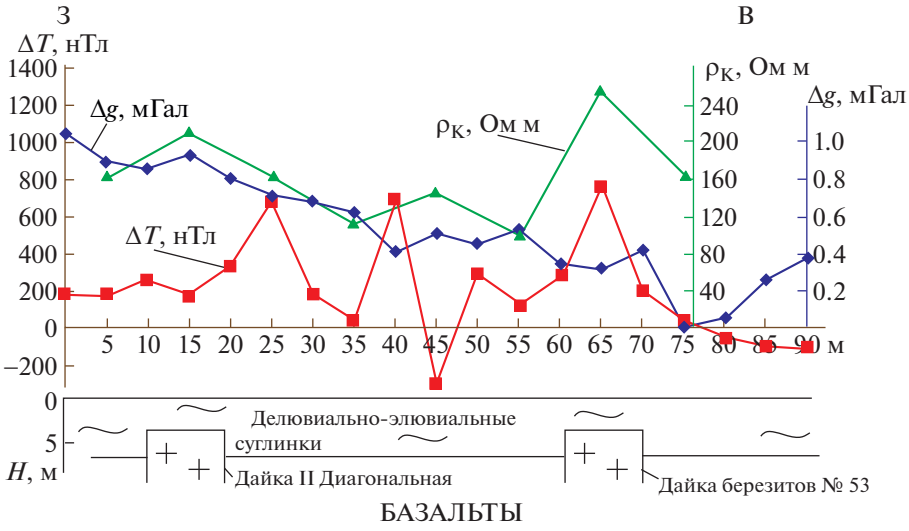


Рис. 2. Кривые $\rho_к$ аномального магнитного и гравитационного полей на профиле № 2 планшета метода срединного градиента вкрест даек Диагональная II и № 53.

аморфного кварца: опал, халцедон [5]. Таким образом, по данным электроразведки методами сопротивлений по значениям УЭС элювиальных суглинков можно предполагать литологический состав коренных пород.

Данные двух профилей дипольного электрического профилирования (ДЭП, питающий диполь 10 м, приемный 10 м, расстояние между непарными электродами 10 м), оценивающих кажущееся УЭС отложений на глубине порядка 5 м, также показывают, что в толще делювиальных суглинков над дайками березитов отмечается повышение УЭС. Над Диагональной II – до 40–50 Ом м, над дайкой № 53 – до 40 Ом м при фоновых значениях УЭС глинистого элювия по базальтам порядка 20–30 Ом м.

Отметим решение одной из важных структурных задач инженерно-геофизических исследований площадок: по данным планшета МСГ, дайка № 53 проходит под дорогой, а не в 10 м западнее ее, как это указано на геологических схемах. Такое в рудном поле отмечается нередко: не подвергавшиеся разработке дайки могут быть указаны на геологической карте и схемах с погрешностью в несколько метров, так как их истинное положение было некогда определено разведочными линиями через 100–250 м, а между ними их положение – интерполировано.

На профиле 2 длиной 90 м планшета МСГ проведены магниторазведочные и гравиразведочные работы шагом 5 м (рис. 2). Диапазон аномального магнитного поля – от минус 350 до 800 нТл относительно фонового значения геомагнитного поля 56000 нТл. Резкая изменчивость поля от пикета к пикету обусловлена наличием металлических предметов (трубы, стальная арматура и др.) на месте бывших теплиц. Нами дополнительно были проведены исследования по трем соседним профилям. Графики аномального магнитного поля столь же изменчивы и между собой не коррелируются. Однако следует сослаться на опыт магниторазведочных работ на участке рудного поля, не осложненного техногенными помехами: над дайкой березитов в толще базальтов, перекрытых 5-метровым слоем суглинков, установлена локальная линейная отрицательная аномалия магнитного поля интенсивностью до сотни нТл. Магнитная восприимчивость березитов составляет $(5–10) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, базальтов – в 5–10 раз выше [4].

Гравитационное поле на профиле имеет региональное понижение 0.9 мГал с запада на восток. На фоне регионального снижения выделяются локальные участки понижения и повышения интенсивностью 0.1–0.3 мГал. Обе дайки березитов локальными отрицательными аномалиями не проявляются. Плотность березитов 2.6 г/см^3, базальтов 2.8 г/см^3. Расчетная локальная отрицательная аномалия от пласта мощностью 10 м с недостатком плотности должна составлять 0.3 мГал. Отсутствие аномалии в наблюденном поле обусловлено выступом выветренных березитов с плотностью порядка 2.5–2.6 г/см^3 в толщу элювиальных суглинков с плотностью порядка 2.0 г/см^3. Здесь образуется гравитирующий объект с избыточной плотностью. Таким образом, относительно легкие дайки березитов, а также кварцевые жилы, залегающие в рудном поле в толще относительно тяжелых базальтов, андезитов, хлоритовых сланцев, гравиразведкой, обнаружить затруднительно, так как искомые объекты в зоне гипергенеза более стойки к выветриванию и формируют в слое относительно легких перекрывающих суглинков выступы-гряды с избыточной плотностью.

Описанная выше структурная особенность верхней части разреза с дайками березитов и

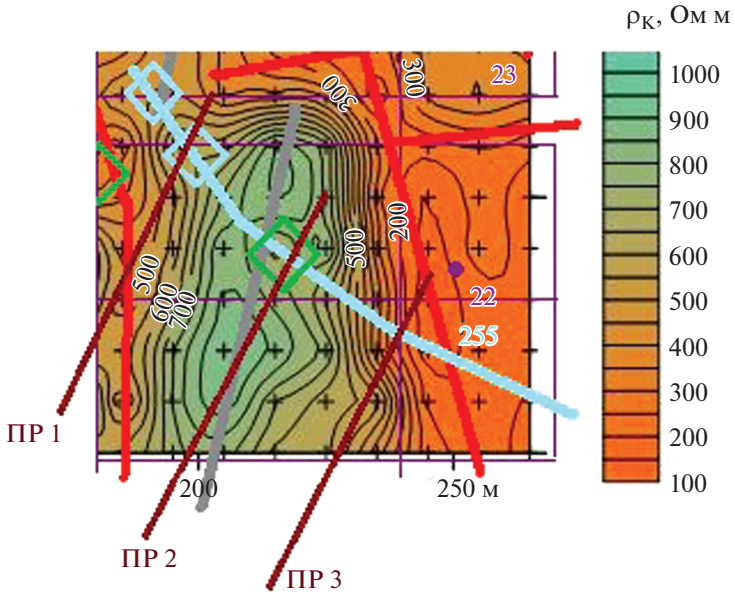


Рис. 3. Фрагмент плана изоом сводных планшетов МСГ с разносами питающей линии 130 м (глубина оценки $\rho_к$ порядка 12–15 м) с отражением элементов выработанной красичной жилы № 255: в северо-западной части остатки жильного кварца или полые выработки проявляются относительным повышением $\rho_к$; в восточном борту высокоомного тела гранит-порфиров заполненное глинистым материалом пространство выработанной жилы проявляется относительным снижением $\rho_к$. Красные линии – оси предполагаемых тектонических нарушений. Голубые и зеленые квадратики – возможные локальные изоляторы и проводники в интервале глубин 12–15 м.

кварцевыми жилами является благоприятной предпосылкой для исследования предполагемых зон подработок малоглубинной сейсморазведкой. Кровля скальных под слоем суглинков и глинисто-щебенистой коры выветривания скальных является сильной отражающей и преломляющей сейсмической границей. На толще базальтов, андезитов, березитов она резкая, так как переходный слой глинисто-щебенистой коры имеет мощность небольшую – 2–4 м. Скорость упругих волн в толще делювиальных суглинков – 400–800 м/с, в базальтах – 1500–2000 м/с, в березитах – до 3000 м/с. Любой из методов малоглубинной сейсморазведки – КМПВ[2], МОГТ[3] – установит мощность слоя рыхлых над вмещающими дайку породами основного состава и структурный выступ дайки скальных березитов в толщу рыхлых. Такой геосейсмический разрез был получен над дайкой золотоносных гранитов в районе Гагарского месторождения. Локальные старательские выработки сечением 1–2 м в толще березитовой дайки возможно обнаружить, если волновое сейсмическое поле будет исследовано в частотном диапазоне более 1 КГц.

Гранит-порфиры Березовского рудного поля (березиты) обладают естественной гамма-активностью порядка 15–25 мкР/час. Это в 2–5 раз выше, чем гамма-активность вмещающих дайки пород основного состава и кварцевых жил. Однако слой делювиальных суглинков мощностью даже в 2–3 м с фоновыми значениями гамма-активности порядка 5–10 мкР/час не позволяет широко применять полевую радиометрию для уточнения положения в разрезе даек березитов.

Что касается решения важнейшей инженерно-геологической задачи обнаружения в верхней части разреза возможных старательских выработок, то она представляется для существующего геофизического комплекса проблемной. Вопросы разрешающей способности электроразведки методами сопротивлений, гравиразведки при поисках локальных объектов рассмотрены [6, 7] в 1980-е годы и остаются столь же неутешительными, несмотря на разработку более чувствительной аппаратуры и некоторых новых методов. Фактически полую выработку (изолятор) можно обнаружить по отрицательной аномалии гравитационного поля, если глубина до ее верхней кромки не превышает ее диаметра. Однако сеть исследований должна быть соизмерима с размером искомой выработки, т.е. порядка 2 × 2 м. Если выработка заполнена глинистыми образованиями, интенсивность аномалии от нее уменьшается до 0.05–0.2 мГал, она становится соизмеримой с аномалиями от многочисленных плотностных неоднородностей в верхней части разреза, которые исследователю неизвестны.

На рис. 3 и 4 приведены материалы геофизических работ, проведенных на трех профилях, пере-

[2] КМПВ – модификация метода преломленных волн, основанная на регистрации первых и последующих вступлений преломленных волн.
[3] МОГТ – метод общей глубинной точки.

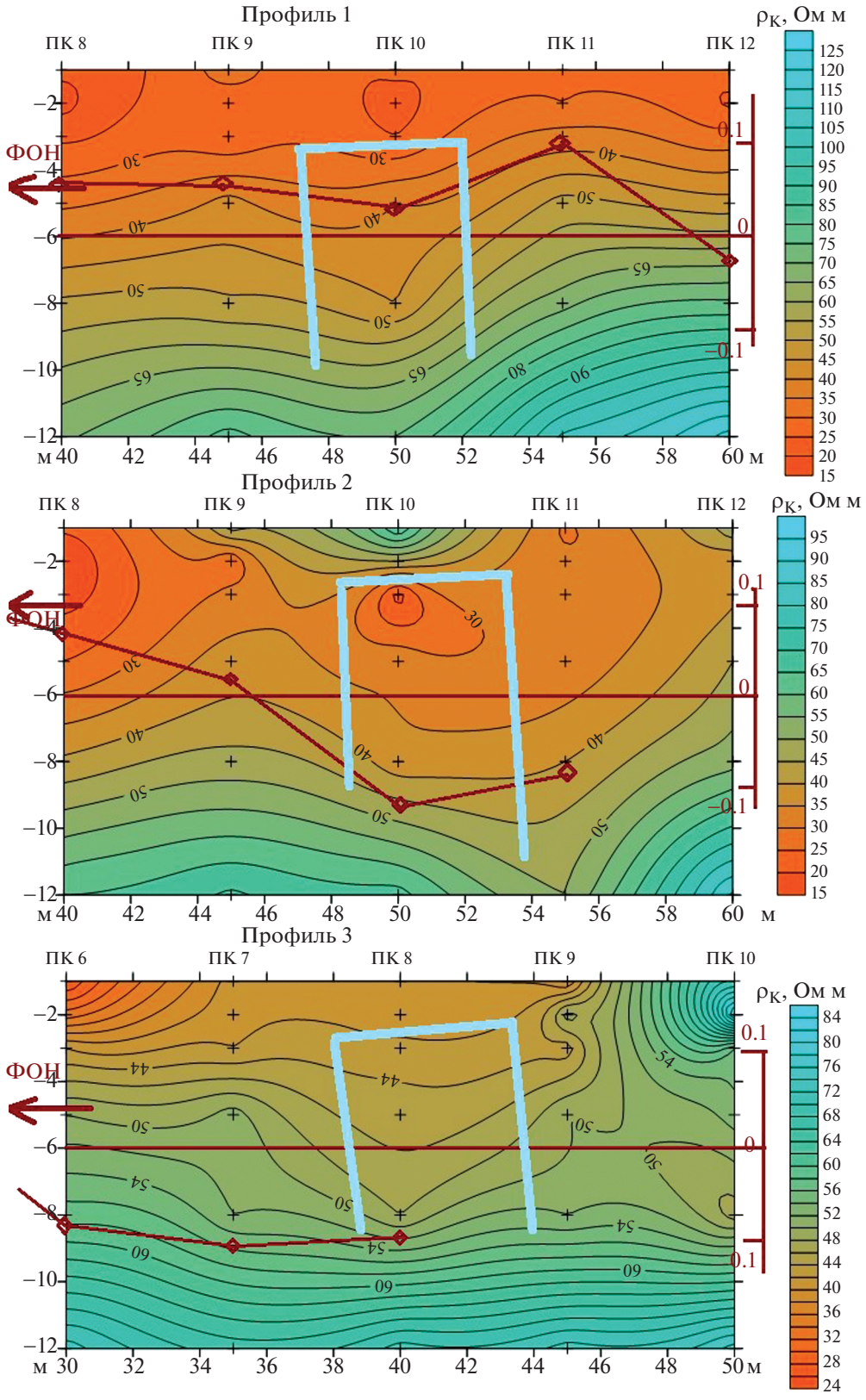


Рис. 4. Вертикальные карты сопротивления по данным ВЭЗ (условная глубина принята в 0.25 от разносов питающей линии) над профилями вкрест выработанной до глубины 17 м красичной кварцевой жилой № 255 мощностью 4–6 м и фрагмент аномального гравитационного поля в редукции Буге, указаны фоновые значения поля над вмещающими породами к юго-западу от жилы. Голубыми линиями показано предполагаемое положение глинистого заполнения на месте выработанной жилы.

секающих красичную жилу № 255. Расстояние между профилями около 30 м, длина их 60 м. Жила № 255 имеет северо-западное простирание, субвертикальная, мощностью 4–6 м, длина ее более 100 м, она выработана и заполнена грунтом. Жила пересекает 10-метровой мощности дайку гранит-порфиров субмеридиональной ориентировки с УЭС 600–1000 Ом м. По данным планшета МСГ с разносом питающей линии 220 м (глубина оценки $\rho_к$ порядка 25–30 м), длиной приемного диполя 10 м, выработанная кварцевая жила на фоне картины изоом, характеризующих УЭС лиственитов (300–400 Ом м), базальтов (100–200 Ом м), гранит-порфиров (600–1000 Ом м) не проявляется. По данным планшетов МСГ с разносами питающей линии 130 м (глубина оценки $\rho_к$ порядка 12–15 м), длина приемной линии 5 м, жила проявляется локальными понижениями и повышениями кажущегося УЭС (см. рис. 3). Последнее подтверждает известное положение о необходимости соизмеримости длины и шага исследований с размерами искомых объектов.

Детализационные работы на профилях методами ВЭЗ, гравиразведки, магниторазведки шагом 5 м показывают (см. рис. 4) довольно однообразную двухслойную структуру верхней части разреза. Магнитное поле на рисунке не приведено, так как оно ровное безаномальное на всех профилях на всей их протяженности в 60 м. Гравитационное поле в северо-восточной части профилей, над зоной выработки дайки, пониженное, что вызвано недостатком массы из-за заполнения выработанного пространства рыхлым глинистым материалом. Однако при наличии 6–10-метрового покрова таких же относительно легких глинистых делювиально-элювиальных суглинков на профиле по гравитационным аномалиям невозможно определить мощность пластоообразного тела суглинков, заполняющих выработанное пространство кварцевой жилы до глубины 17 м.

По данным ВЭЗ (симметричная установка, приемный диполь 2 м, полуразносы питающей линии AB/2 равнялись 2, 3, 5, 9, 15, 25 м) на глубине порядка 8–10 м выделяется опорная высокоомная граница по кровле скальных пород. Положение пласта-проводника из суглинистого заполнителя выработанной жилы не проявляется в верхней рыхлой части разреза и среди скальных до глубины порядка 12 м.

Таким образом, по детализационным геофизическим работам над отработанной кварцевой жилой можно сделать вывод о заполнении отработанного пространства глинистым рыхлым электропроводным материалом. Глубину отработки установить не удается. И можно сделать вывод об отсутствии пустот в недрах.

Применение георадарной съемки для исследования зон подработок даек березитов и кварцевых жил возможно и целесообразно, если мощность рыхлых глинистых образований над искомыми объектами не превышает первые метры – из-за высокой поглощающей способности суглинков для ультракоротких радиоволн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, опыт проведения инженерных геофизических исследований зон подработок березитовых даек и кварцевых красичных жил на площади Березовского рудного поля позволяет сделать вывод об информативности различных геофизических методов. Самыми информативными в комплексе методов являются электроразведочные методы сопротивлений (МСГ, ВЭЗ, СЭП) и малоглубинная сейсморазведка. При отсутствии техногенного загрязнения участков исследований истинное положение даек березитов и кварцевых жил можно выявить магниторазведкой.

Обнаружение полых выработок в толще дайки березитов или кварцевой жилы возможно при их размерах, соизмеримых с глубиной до их верхней кромки, а также при использовании георадарной съемки над участками, не перекрытыми толщей делювиально-элювиальных суглинков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабенко В.В., Поленов Ю.А., Огородников В.Н.* Роль интрузивного магматизма в генезисе Березовского золоторудного месторождения (Средний Урал) // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 1 (41). С. 39–49.
2. *Гадельшина Э.Х., Борисов И.О., Кузин А.В.* Геофизические методы при инженерных исследованиях даек березитов // Уральская горнопромышленная декада. Уральская горная школа – регионам: матер. междунар. научно-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2020. С. 63–64.
3. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона / В.Н. Сазонов, В.Н. Огородников, Ю.А. Поленов и др. Екатеринбург: Изд. УГГГА, 1997. 226 с.
4. *Кузин А.В., Ветошкин В.Д., Зырянова Е.С.* Исследования геофизическими методами зон старательских разработок золотоносных березитизированных даек и кварцевых жил // УГЖ. 2019. № 3 (129). С. 63–67.
5. *Кузин А.В.* Исследование профиля коры выветривания Березовского золоторудного месторождения методом ВЭЗ // Разведка и охрана недр. 2019. № 8. С. 29–31.
6. Рекомендации по изучению карста геофизическими методами / ПНИИИС, М.: Стройиздат, 1986. 112 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001334384
7. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. М.: Недра. 1990. 428 с.

ENGINEERING GEOPHYSICS FOR THE STUDY OF UNDERMINED ZONES AROUND BERESITE DYKES

A. V. Kuzin[a,#], E. Kh. Gadel'shina[a], and I. O. Borisov[a]

[a] *Ural State Mining University, ul. Kuibysheva, 30, Yekaterinburg, 620144 Russia*

[#] *E-mail: kuzin-av@mail.ru*

The applicability and resolution of geophysical methods (electric prospecting, gravity prospecting, magnetic prospecting, seismic prospecting, and radiometry) have been assessed for the study of prospectors' mining zones of gold-bearing beresite dykes and quartz veins. Electrical resistivity prospecting and shallow seismic prospecting appear to be the most effective in solving exploration problems. The search for prospector mine workings of the first meters in size within the gold-bearing bodies is possible, in case the depth of their occurrence does not exceed 2–3 times their cross-section. In this case, the measurement network should be comparable to the sizes of the bodies under study.

Keywords: *engineering geophysics*, *undermined zones*

REFERENCES

1. Babenko, V.V., Polenov, Yu.A., Ogorodnikov, V.N. *Rol' intruzivnogo magmatizma v genezise Berezovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Srednii Ural)* [The role of intrusive magmatism in the genesis of the Berezovskoe gold ore deposit (the Middle Urals)]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2016, no. 1 (41), pp. 39–49. (in Russian)
2. Gadelshina, E.Kh., Borisov, I.O., Kuzin, A.V. *Geofizicheskie metody pri inzhenernykh issledovaniyakh daek berezitov* [Geophysical methods in engineering studies of berezite dikes]. *Ural'skaya gornopromyshlennaya dekada. Ural'skaya gornaya shkola – regionam. Mater. mezhdunar. nauchno-prakt.konf.* [The Urals mining decade. The Urals mining school to the regions. Proc. Intern. Sci. and Pract. Conference]. Yekaterinburg, UGGU, 2020. pp. 63–64. (in Russian)
3. Sazonov, V.N., Ogorodnikov, V.N., Polenov, Yu.A., et al. *Zolotoorudenenie Ekaterinburgskogo geologicheskogo poligona* [Gold ore of the Yekaterinburg geological test site]. Yekaterinburg, UGGGA Publ., 1997, 226 p. (in Russian)
4. Kuzin, A.V., Vetoshkin, V.D., Zyryanova, E.S. *Issledovaniya geofizicheskimi metodami zon staratel'skikh razrabotok zolotonosnykh berezitizirovannykh daek i kvartsevykh zhil* [Geophysical research of gold-bearing beresitized dikes and quartz veins by geophysical methods]. *Ural'skii geologicheskii zhurnal*, 2019, no. 3 (129), pp. 63–67. (in Russian)
5. Kuzin, A.V. *Issledovanie profilya kory vyvetrivaniya Berezovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya metodom VEZ* [Investigation of the weathering crust profile of the Berezovskoe gold ore deposit using the VES method]. *Razvedka i okhrana nedr,* no. 8, 2019. pp 29–31. (in Russian)
6. *Rekomendatsii po izucheniyu karsta geofizicheskimi metodami* [Guidelines for the study of karst by geophysical methods]. PNIIIS, Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 112 p. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001334384. (in Russian)
7. Ogil'vi, A.A. *Osnovy inzhenernoi geofiziki* [Basics of engineering geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 428 p.

ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2021, № 5, с. 94–96

РЕЦЕНЗИИ

РЕЦЕНЗИЯ НА КОЛЛЕКТИВНУЮ МОНОГРАФИЮ “ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ”

© 2021 г. А. А. Лаврусевич[1,*]

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

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

DOI: 10.31857/S0869780921040056

Важнейшим событием в истории современного человечества является эмпирическое обнаружение грозной опасности, нависшей над всем цивилизованным миром и Биосферой в целом, которая в научной литературе названа – техногенез! Термин ввел А.Е. Ферсман в 1934 г., понимая под ним геохимическое перемещение элементов в результате горнопромышленной деятельности. В настоящее время понятие расширено и представляет собой процесс изменения природных комплексов и биогеоценозов под воздействием производственно-хозяйственной деятельности человека. Действительно, еще в начале XX в. В.И. Вернадский говорил о том, что деятельность технически вооруженного человечества стала сопоставима с геологическими силами, меняющими облик Земли. Увеличение численности населения Земли почти до 10 млрд человек к 2050 г., из которых большая часть будет проживать на урбанизированных территориях, приведет к еще большему антагонизму природной среды и техногенеза. Что может спасти человеческую цивилизацию? Только стратегия устойчивого развития, основанная на сохранении баланса между хозяйственной деятельностью человека и требованиями охраны окружающей среды, может дать шанс человечеству выжить, хотя исходя из сегодняшних политических реалий, это выглядит весьма утопично.

Безусловно, что эта проблема стоит особенно остро для городов как мест наибольшей концентрации населения, объектов инфраструктуры и промышленности. Обеспечить экологическую безопасность в мегаполисах и крупных промышленных центрах крайне важно и одновременно сложно, так как проявления природных опасностей усугубляются техногенными факторами и могут повлечь за собой чрезвычайные ситуации и крупные ущербы.

В связи с вышеизложенным, выпуск коллективной монографии “Геологический риск урбанизированных территорий”[1], посвященной проблеме оценки риска опасных природно-техногенных процессов в пределах урбанизированных территорий, событие весьма своевременное и актуальное.

Данная коллективная монография представляет собой результаты комплексных исследований, выполненных сотрудниками ИГЭ РАН под руководством академика В.И. Осипова в 2016–2020 гг. в рамках проекта “Оценка риска опасных природных процессов на урбанизированных территориях”, поддержанного Российским научным фондом (№ 16-17-00125). Коллективом авторов, объединившим ученых, специализирующихся в разных направлениях геоэкологии и инженерной геологии (В.И. Осипов, А.В. Аникеев, В.Н. Бурова, И.В. Козлякова, Г.П. Постоев, О.Н. Еремина, Ю.А. Мамаев, А.И. Казеев, Е.В. Булдакова, П.В. Стольникова, М.М. Кучуков), решалась задача разработки методологии оценки риска опасных геологических процессов на урбанизированных территориях. Обеспечение природной безопасности, а также экономической эффективности строительства и эксплуатации городской инфраструктуры невозможно без четкого понимания вида и типа опасности, уязвимости сооружения и оценки риска. Данная работа, безусловно, инновационная, поскольку, во-первых, несмотря на многочисленные исследования в области геологических рисков, проводимых в разных странах мирах, до сих пор не выработано единых методологических подходов к их оценке на городских территориях; во-вторых, уникальная и не имеющая аналогов среди опубликованных работ, так как представляет результаты исследований геологических рисков для урбанизированных территорий с учетом изменения климата и интенсивной техногенной деятельности человека.

В книге, состоящей из введения, 6 глав и заключения, последовательно изложены современные подходы и принципы риск-анализа в геологии, показана специфика урбанизированных территорий как объектов риск-анализа, освещен

[1] Геологический риск урбанизированных территорий / Кол. авт.: В.И. Осипов, А.В. Аникеев, В.Н. Бурова, И.В. Козлякова и др. Под. ред. В.И. Осипова. М.: РУДН, 2021. 310 с.

мировой опыт исследования и картографирования геологических рисков в городах.

В первой главе приведены основные понятия опасности, уязвимости и риска, анализ классификаций природных (геологических) опасностей и рисков, методология риск-анализа и сложности интегральной оценки риска. Показано, что до настоящего времени не только не существует единой общепринятой методики количественной оценки риска от развития экзогенных геологических процессов, но имеется масса разногласий даже в терминологической базе, характеризующей рассматриваемое, относительно новое направление в инженерной геологии. Приведенная авторами методология оценки риск-анализа показывает единственно верный подход, состоящий из идентификации процесса или их совокупности, оценку уязвимости и риска, а также планируемые митигационные мероприятия. Сложность интегральной оценки риска заключается в том, что как правило, одновременно проявляются несколько опасных природных процессов, что вызывает необходимость разработки метода типизации процессов, частоты проявления, существующей пораженности территории и др.

Во второй главе приводятся современные тренды развития урбанизированных территорий и связанные с ними экологические проблемы. Наряду с созданием максимально комфортных условий в городах, растут транспортные проблемы, загрязнение воздуха, активизируются природно-техногенные геологические процессы. Для городов все более актуальной проблемой становится накопление и утилизация твердых коммунальных отходов, объемы которых прямо пропорциональны росту благосостояния населения. За счет выноса из городских округов промышленных предприятий глобальным трендом становится редевелопмент городских территорий. Территориальное планирование вызывает необходимость все более активного освоения подземного пространства городов, которое является современной тенденцией всех мировых мегаполисов. Это связано с нехваткой мест на поверхности и стремлением к улучшению экологических условий города. Именно территориальное планирование – наиболее эффективный экономический инструмент устойчивого развития урбанизированных территорий.

Из всего комплекса опасных процессов геологической природы инженеры-геологи выделяют землетрясения, оползни и обвалы, абразию, эрозию, провалы и оседания поверхности карстово-суффозионной и техногенной природы, а также подтопление. Методика оценки природных опасностей на основе специального картографирования (ГИС-метод многофакторного анализа инженерно-геологических данных) городских территорий позволяет производить многокритериальную оценку территории, рационально и с минимальными затратами проектировать сооружения.

Детальной характеристике таких опасных геологических процессов как оползни, карст и суффозия, проявляющихся на урбанизированных территориях посвящены **третья и четвертая** главы монографии. Приводится типизация оползней по механизму оползневого процесса. Рассматриваются оползни территории Москвы и их активизация в связи с техногенезом. Предложена методика оценки риска оползневого процесса и факторов оползневой опасности. При рассмотрении территории Москвы с позиций оценки карстово-суффозионной опасности дается схема формирования воронок и рассматривается влияние карстового процесса на их образование, скорость растворения карбонатов и делается заключение, что величина опасности и риска образования карстово-суффозионных воронок на территории Москвы не зависит от интенсивности *современного* выщелачивания каменноугольных отложений. В качестве расчетных способов определения диаметров воронок предложены модифицированные модели среза пласта по кругло цилиндрической поверхности и обрушения параболического свода. Рассмотрены некоторые эффекты самоорганизации грунтовой толщи в окрестности ослабленных участков массива и способы их учета в расчетных моделях, а также зональное строение области влияния карстовой полости. Дается оценка карстово-суффозионной опасности на конкретном примере проектируемого жилого комплекса в районе Фили с оценкой вероятного ущерба.

В пятой главе предложены методологические подходы к оценке и картографированию рисков от опасных экзогенных процессов на техногенно-урбанизированных территориях. Рассматривается развитие опасных экзогенных процессов на территории Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации Пермского края. Пестрый петрографический состав, сложный разломно-блоковый характер их залегания, гидравлическая связь поверхностных и подземных вод, изменения состояния и свойств пород в массиве в результате процессов гипергенеза, техногенная нагрузка и др. характеризуют высокую сложность инженерно-геологических условий района. Отмечаются значительные деформации земной поверхности в виде провалов до 90 м глубиной и до 400 м в поперечнике, участки оседаний, затопление выработанного подземного пространства и др. явления, на которые накладываются сейсмические воздействия и тектонические движения. Это приводит к деформациям и разрушениям промышленных объектов, административных и жилых зданий, транспортных коммуникаций и других сооружений. Возникла необходимость изучения, оценки, прогнозирования и

картографического отображения степени опасности геологических процессов, уязвимости объектов и рисков на территории г. Березники. Составлены специальные инженерно-геологические карты рисков, что позволило установить основные элементы рисков; дать их качественную и количественную оценку; разработать защитные мероприятия.

В шестой главе раскрывается интегральная оценка и картографирование риска экзогенных геологических процессов (на примере Москвы). Выполнен всесторонний анализ геологического строения и инженерно-геологических условий территории города на геоинформационно-картографической основе с учетом требований наземного и подземного строительства. Составлен комплект тематических геологических карт, который является основой для зонирования и интегральной оценки геологического риска на урбанизированной территории для существующей инфраструктуры. Представлены методологические подходы к оценке интегрального природного риска для Москвы в разных масштабах: 1 : 25000–1 : 50000 и 1 : 10000 и крупнее. Для масштабов 1 : 25000–1 : 50000 использованы характеристики природных процессов и уязвимости городской среды на основании качественного анализа плотности и возраста застройки, функционального назначения, архитектурной и исторической ценности зданий и сооружений.

В основе методических подходов интегральной оценки риска в масштабах 1 : 10000 и крупнее заложен выбор и обоснование критериев формирования риска в пределах конечных таксонов районирования оцениваемой территории по природно-техногенным условиям, с присвоением баллов каждому критерию на основе экспертной оценки, учитывающей их взаимовлияние. Дальнейшее развитие научных исследований оценки риска урбанизированных территорий в крупном масштабе авторам видится в соотнесении балльных оценок риска с экономическими эквивалентами, т.е. в приравнивании 1 балла определенным экономическим потерям, и в создании унифицированной методики оценки риска мегаполисов. Акцент в исследованиях делается на оценку рационального использования городских территорий с учетом прогноза экологических последствий активного техногенеза.

Рецензируемая монография объединяет фундаментальные научные исследования по изучению геологического риска с практическими результатами, полученными в натурных условиях, что позволит улучшить стратегическое планирование развития городов в будущем. Данная работа содержит ссылки на 292 литературных источника, немалая доля из которых опубликована за рубежом в последние 20 лет. Это свидетельствует о глубокой проработке проблемы авторами и широком охвате всех современных мировых тенденций и достижений в данной области. Рукопись дополнена 37 таблицами и великолепно иллюстрирована. В процессе изложения, материал сопровождают схематические разрезы, карты, фотографии (82 рисунка), что сильно облегчает восприятие изложенного материала.

Представленная монография – это обобщение огромного разнородного материала по процессам, закономерностям их развития и проявления, степени техногенной нагрузки территорий, взаимовлиянию природных и техногенных факторов, возможным последствиям (рискам) таких взаимодействий. Монография на наш взгляд представляет несомненный интерес для широкого круга специалистов, занимающихся анализом природно-техногенных рисков, а также смежных направлений в геоэкологии, инженерной геологии, урбанистики, она также будет интересна студентам профильных ВУЗов.