

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2022

Методика выявления этапов формирования ущелистых речных долин
в активных орогенах

С. А. Несмеянов, О. А. Воейкова

3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Закон Кулона–Мора и изменение напряженно-деформированного состояния
оползнеопасного массива

Г. П. Постоев, А. И. Казеев, М. М. Кучуков

16

Сейсмичность России в 2021 году

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

26

Калибровка модели геоинформационной системы “Экстремум”
для оценки потерь от землетрясений восточной зоны Северного Кавказа

Н. И. Фролова, И. П. Габсатарова, С. П. Суцев, Н. С. Малаева

34

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Редкоземельные элементы в атмосфере Якутска

В. Н. Макаров

56

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение дистанционных методов при вероятностной оценке поражения
линейного сооружения

А. С. Викторов, М. В. Архипова

65

Оценка социально-экономических последствий опасных природных явлений
на примере Башкирии

Д. Ю. Васильев, Ю. Г. Воронова, С. В. Новиков, В. А. Семенов, А. А. Чибилёв

75

Наука “геоэкология” как пример имитации эпистемологического единства
при расхождении: объектов, субъектов, проблем

И. Н. Заиканова

81

ХРОНИКА

XXIII Сергеевские чтения “Фундаментальные и прикладные вопросы
современного грунтоведения”

92

Contents

Number 4, 2022

Methodology of identifying the formation stages for river valley gorges
in active orogens

S. A. Nesmeyanov, O. A. Voeikova

3

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Coulomb-More's law and the change in the stress-strain state
of a landslide-prone massif

G. P. Postoev, A. I. Kazeev, M. M. Kuchukov

16

Seismicity of Russia in 2021

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

26

Calibrating the "Extremum" system model for earthquake loss assessment
in the eastern zone of the Northern Caucasus

N. I. Frolova, I. P. Gabsatarova, S. P. Suchshev, N. S. Malaeva

34

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Rare-earth elements in the atmosphere of Yakutsk

V. N. Makarov

56

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

The use of remote sensing data for probabilistic assessment of impact
on a linear structure

A. S. Victorov, M. V. Arkhipova

65

Assessing the social and economic impacts of natural hazards
with Bashkiria as a case study

A. Yu. Vasil'ev, Yu. G. Voronova, S. V. Novikov, V. A. Semenov, A. A. Chibilev

75

Geocology science as imitation of epistemological unity in diversion:
subjects, objects, and problems

I. N. Zaikanova

81

CHRONICLE

XXIII Scientific conference in commemoration of academician E.M.Sergeev
"Fundamental and applied issues in the modern soil science"

92

УДК 551.4; 551.240

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ УЩЕЛИСТЫХ РЕЧНЫХ ДОЛИН В АКТИВНЫХ ОРОГЕНАХ

© 2022 г. С. А. Несмеянов¹, О. А. Воейкова^{1,*}¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: voa49@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.2022 г.

После доработки 18.04.2022 г.

Принята к публикации 27.04.2022 г.

Предлагаемая методика выявления этапов формирования горных ущелий опирается на применение оротектонического метода. С его помощью выявляются схемы разномасштабных эрозионно-аккумулятивных циклов в ущелье и в смежной долине крупной реки. Эти схемы сопоставляются между собой и последовательно коррелируются с местными и региональными стратиграфическими схемами для датировки выделенных этапов. Предложенный комплекс геолого-геоморфологических и корреляционных исследований может быть использован для изучения истории формирования ущелистых речных долин в активных орогенах типа Кавказа и Тянь-Шаня; может быть полезен для проведения палеоэкологических реконструкций при археологических исследованиях и инженерно-геологических изысканиях.

Ключевые слова: ущелье, речная долина, эрозионно-аккумулятивный цикл, терраса, террасовый ряд, ороген

DOI: 10.31857/S0869780922040051

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в ущельях рек и ручьев, прорезающих горные хребты, бывает чрезвычайно трудно обнаружить даже отдельные следы террасирования, а тем более установить строение всего террасового ряда. Между тем в ряде случаев подобные исследования, в том числе палеоэкологические, весьма актуальны. Примером может служить необходимость оценки возраста пещер с палеолитическими стоянками и т.п.

В самом общем виде поставленная задача решается путем сопоставления террасовых образований ущелья с террасовым рядом ближайшей крупной (магистральной) долины, а в случае необходимости и с более удаленными долинами, на террасовый ряд которых опирается местная стратиграфическая схема. При этом во многих случаях приходится решать ряд важных общих и частных проблем.

Проблема применения оротектонического метода. Возрастное расчленение рельефа с выявлением строения террасовых рядов долин и водоразделов является одной из основных задач разрабатывавшегося длительное время оротектонического метода [11]. Данный метод предполагает создание сети геоморфологических профилей орогена, включающей основные стратотипы и

учитывающей неотектоническое районирование, которое определяет деформации выделяемых геоморфологических уровней. В этом методе анализируются затрагиваемые ниже проблемы выявления, корреляции и датировки террасовых рядов и геоморфологических уровней.

Проблема строения типичного неоплейстоценового террасового ряда активных орогенов. Схема строения террасового ряда в горных областях может быть сложной, несколько различающейся в блоковых и складчато-блоковых элементах [10, 7, 11]. Обычно в тылу долины располагается подзона “русловой лестницы”, наиболее протяженная у водотоков с относительно слабой эрозионной активностью. Возраст самой молодой ступени этой “лестницы” определяет время консервации соответствующего отрезка долины, когда в нем прекращается существенная глубинная эрозия. В долине на границе с впадиной происходит “ныряние” террас с налеганием молодого аллювия на древний, т.е. наблюдаются “террасовые ножницы”. В долинах, пересекающих чередование воздымающихся разновысотных блоков, ущелистые участки связаны, как правило, с горстами, а наиболее четко выраженные террасовые ряды обычно приурочены к расширениям в относительно пониженных структурных ступенях и локальных

впадинах. Наиболее сложно выявляются террасовые ряды в ущельях маловодных рек, часто служащих притоками более крупных рек. В них законсервированными могут быть значительные по протяженности верховья, вплоть до большей части или всего ущелья. Именно к таким законсервированным частям ущелий бывают приурочены пещерные стоянки древнего человека, например, известная стоянка Тешик-Таш в горах Средней Азии [7, 14].

Проблема датировки четвертичных террасовых образований. Данная проблема имеет ряд аспектов, важных для датировки местных террас [9, 7, 11].

Во-первых, в ряде орогенов, в том числе в Тянь-Шане и на Кавказе, традиционно фиксируются четыре разномасштабных по глубине и ширине группы врезов — последовательные группы высоких, средних, низких и прирусловых террас. При этом отмечается, что группы низких и средних террас обычно двучленны. Но встречаются ситуации с более дробным делением (“расщеплением”) этих региональных подразделений.

Во-вторых, отмечается принципиальная разновозрастность основных рубежей Общей стратиграфической шкалы (ОСШ) неоплейстоцена и реальных эрозионно-аккумулятивных циклов, формирующих террасы. У таких циклов начальные фазы активизации глубинной эрозии обычно отвечают регрессивным стадиям морей и океанов и ледниковым стадиям, а подразделения ОСШ начинаются с межледниковых и трансгрессивных стадий. Поэтому индексация их различна. Для упомянутых групп террас используются индексы Q_1 , Q_2 , Q_3 и Q_4 , отражающие последовательность их формирования, а для неоплейстоценовых подразделений ОСШ — индексы: Q_I , Q_{II} , Q_{III} и Q_{IV} .

Следует отметить некоторые особенности строения региональных стратиграфических схем. В них, как правило, три последних комплекса двучленны. Кроме того, в ряде регионов активного новейшего орогенеза многие региональные террасы, особенно террасы комплекса средних высот (Q_2), подвержены локальному расщеплению.

В-третьих, важно учитывать неоднократные изменения ОСШ четвертичных отложений, влияющие на датировку местных террасовых рядов. Не вдаваясь в сложную историю данного вопроса, отметим необходимость учета следующих важных положений. Основание четвертичного периода последовательно понижалось сначала на уровень 1.8 млн лет, а в настоящее время располагается на уровне 2.6 млн лет назад. Теперь этот период делится на голоцен ($Q_{IV} = 0-0.0117$ млн лет) и плейстоцен (0.0117–2.6 млн лет). Плейстоценовый отдел (надраздел) включает: неоплейстоцен (0.0117–0.781 млн лет), эоплейстоцен ($Q_E =$ калабрий с датировкой в интервале 0.781–1.8 млн лет) и палеоплейстоцен ($Q_P =$ гелазий в интервале 1.8–

2.6 млн лет) [2, 16]. В результате этих изменений возможны разночтения в индексации отдельных подразделений, например, эоплейстоценовые террасовые образования ранее часто датировались индексом $N_2^3-Q_1$.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

В качестве объекта, на примере которого иллюстрируется применяемая методика, рассматриваются фрагменты магистральной долины р. Баксан и ущелья ее правого притока малой р. Фандуко на северном склоне Центрального Кавказа. В этом ущелье расположена пещера Сарадж-Чуко, в которой находится стоянка палеолитического человека [3].

Целью исследования является необходимость определения возраста возникновения пещерной полости для оценки принципиальной возможности выявления следов более раннего ее посещения древними людьми по сравнению с уже выявленными культурными слоями. Как будет показано ниже, достижение этой цели встречает целый ряд препятствий, обусловленных местными особенностями геоморфологического и неотектонического строения данного района.

Исследуемая низкогорная территория характеризуется относительно сглаженными водоразделами, широкими разработанными долинами крупных рек (Баксан, Малка, Подкумок) и узкими ущелистыми долинами небольших рек, в том числе р. Фандуко (рис. 1).

Анализируемый участок долин Баксана и Фандуко расположен в пределах крупной Чегемской структурной ступени, которая в свою очередь включает ряд локальных структур (рис. 2) [12].

Водораздел Баксана и Фандуко сложен почти 250-метровой покровной Нижнечегемской толщей липаритовых лав, риолитовых игнимбритов и туфов [6]. Абсолютный возраст данной толщи определяется рядом датировок в интервале от 3.7 ± 0.6 до 2.1 ± 0.2 млн лет [1, 17], что позволяет считать ее позднеплиоценово-раннепалеоплейстоценовой. Соответственно, наиболее древний водораздельный геоморфологический уровень может быть палеоплейстоценовым (точнее — позднепалеоплейстоценовым), а первый эрозионный врез в этот водораздел рассматриваемых долин — эоплейстоценовым.

СТРОЕНИЕ ТЕРРАСОВОГО РЯДА МАГИСТРАЛЬНОЙ ДОЛИНЫ

Террасы р. Баксан изучались на значительном расстоянии (табл. 1, рис. 3) [15]. Но исходная схема потребовала некоторой доработки, поскольку

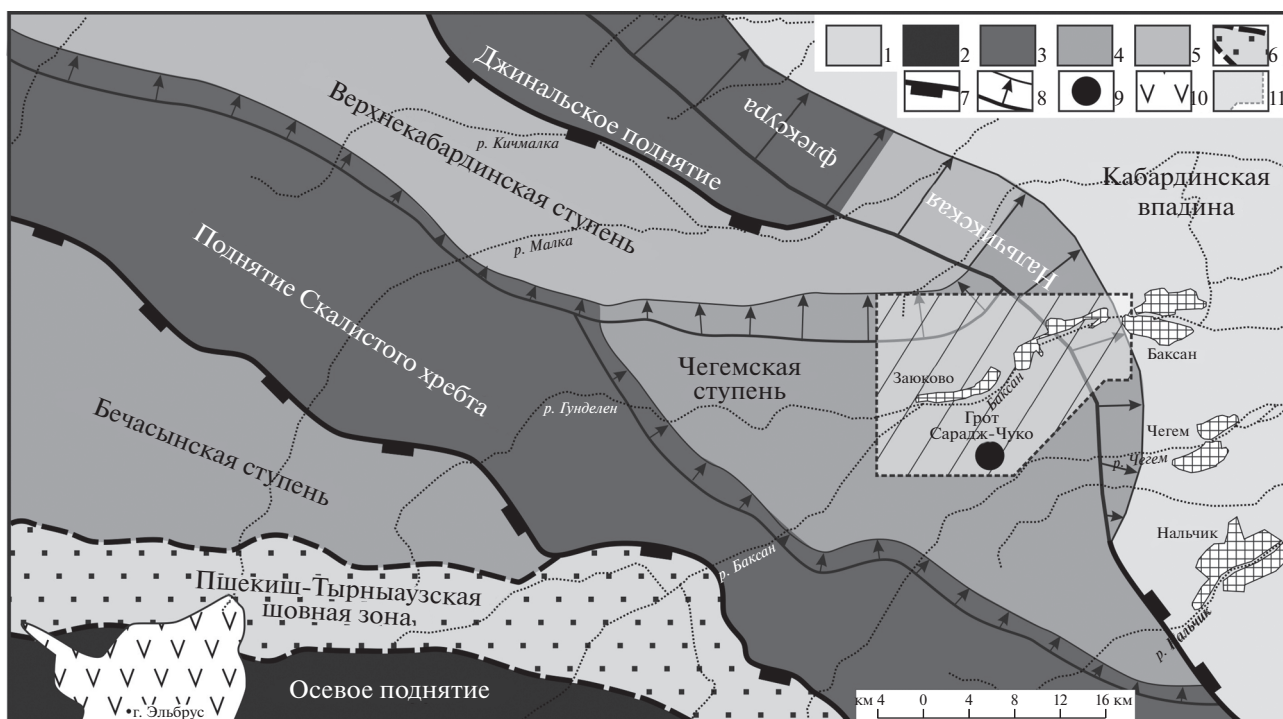


Рис. 1. Мелкомасштабная схема неоструктурного районирования восточной части Центрального Кавказа в районе бассейнов рек Чегем, Баксан, Малка и Подкумок. 1 – Кабардинская впадина; 2 – осевое поднятие мегасвода; 3–5 – структуры северного крыла мегасвода: 3 – зоны поднятий, 4–5 – структурные ступени (4 – высокие, 5 – низкие); 6 – Пшекиш-Тернаузская шовная зона; 7 – разрывы; 8 – флексуры; 9 – грот Сарадж-Чуко; 10 – вулкан Эльбрус; 11 – территория, неотектоническая схема которой представлена на рис. 2.

опиралась исключительно на группировку террас по высоте, к тому же без учета (“отбраковки”) локальных террас врезывания и мощности покровных отложений. Кроме того, естественные неровности рельефа не позволяют оценивать высоты террас с точностью до 1 м, как это делалось ранее. Правильнее пользоваться округленными величинами.

Применение стратиграфо-геоморфологического подхода с выделением разномасштабных комплексов эрозионных циклов [7], т.е. учета глубин эрозионных врезов, позволило несколько уточнить первоначальную схему [3]. В частности, было установлено, что по величине (глубине) эрозионного вреза (45 м) терраса, считавшаяся ранее наиболее древним элементом Кызбурунского комплекса, должна относиться к Малкинскому комплексу. Соответственно, Малкинский комплекс включает не три, а четыре террасы. Подобный пересмотр обычен при контроле морфологической группировки террас с помощью масштабного эрозионно-циклового расчленения, особенно при первоначально 3-членном составе низких террас [7, с. 47].

На рассматриваемом участке в пределах Нальчикской региональной флексуры наблюдаются хорошо выраженные “террасовые ножницы” р. Бак-

сан. Перед ними находится расширение долины у с. Заюково в Заюкской впадине (см. рис. 2, 4). Выше долина суживается в пределах Западнозаюкского грабена (3), расположенного между Харахорским (1) и Шитлямыжским (2) поднятиями (см. рис. 2).

Наиболее полно неоплейстоценовый террасовый ряд выражен в Заюкской впадине, на левобережье р. Баксан (рис. 4).

Здесь результирующая схема, разработанная с учетом приведенных выше замечаний, в самом общем виде выглядит следующим образом (табл. 2, рис. 5).

В приводораздельной части узкая эоплейстоценовая (**Сармаковского комплекса** Q_E) гряды обрамляется довольно широким раннеоплейстоценовым (**Кубинского террасового комплекса** Q_1) высоким террасовым уровнем, который восточнее ближе к Нальчикской флексуры (в начале зоны “террасовых ножниц”) трансформируется мощным (до 100 м) аллювием и, в свою очередь, очевидно, перекрывается покровными отложениями. Глубина Кубинского эрозионного вреза достигает 180 м.

Малкинский террасовый комплекс (Q_2) в средней части с. Заюково представлен двумя широкими цокольными террасами – это комплекс террас

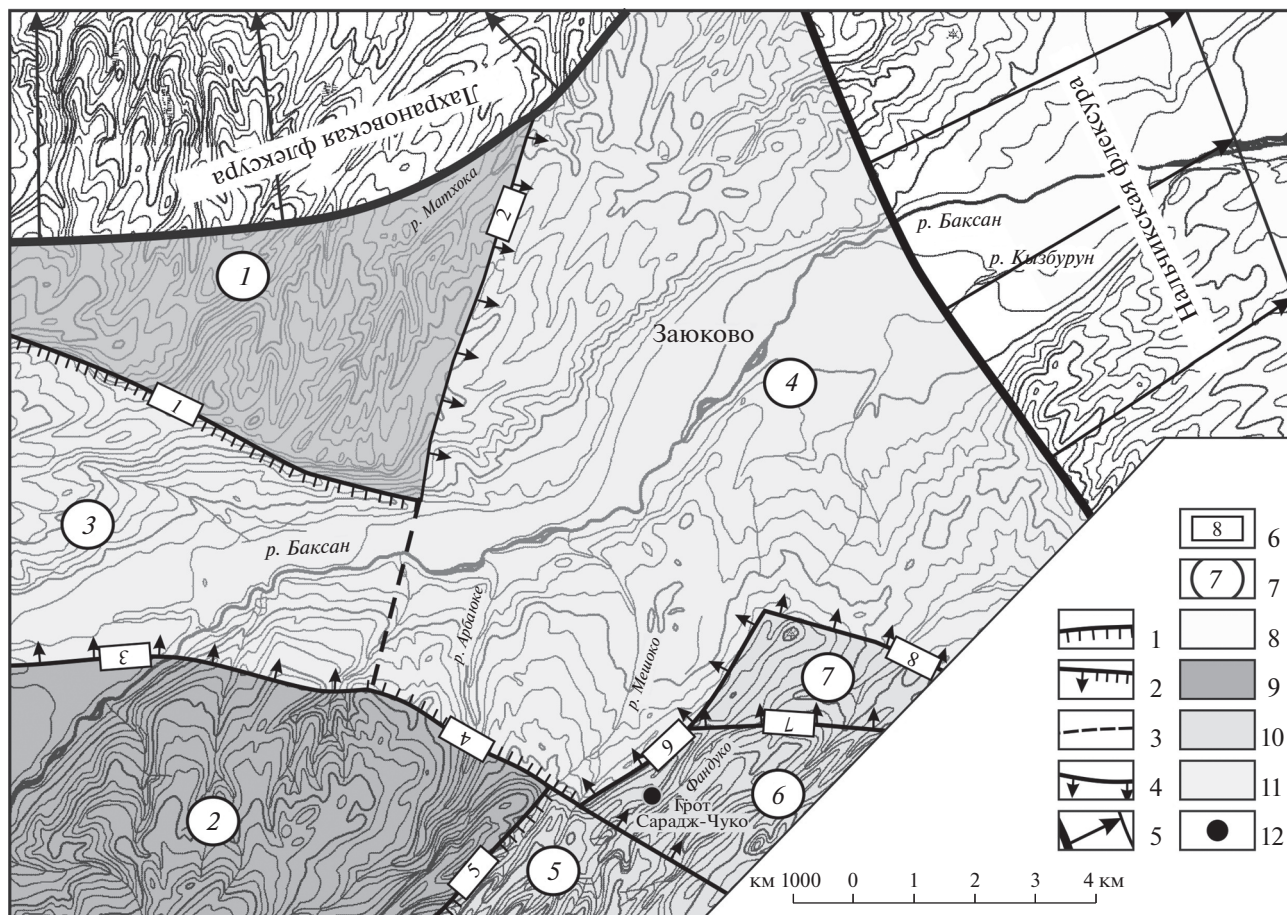


Рис. 2. Схема локального эоплейстоцен-неоплейстоценового районирования долины р. Баксан в районе села Заюково и смежных территорий. 1–3 – разрывные нарушения: 1 – сбросы, 2 – сбросо-флексуры, 3 – погребенные разрывы; 4–5 – флексуры: 4 – локальные, 5 – региональные; 6–7 – номера структур: 6 – разрывных и флексур (1 – Южно-харахорский сброс, 2 – Восточнохарахорская флексура – погребенный сброс, 3 – Северошитлярская флексура, 4 – Арсаюкский сброс-флексура, 5 – Мешокский сброс, 6 – Южнозаюкинская флексура, 7 – Среднефандукская флексура, 8 – Северофандукская флексура); 7 – блоковых (1 – Харахорское поднятие, 2 – Шитлямышское поднятие, 3 – Западнозаюкский грабен, 4 – Заюкская впадина, 5 – Мешокская ступень, 6 – Фандукская ступень, 7 – Северофандукская ступень); 8–11 – типы блоковых структур: 8 – грабены, 9 – горсты, 10 – структурные ступени, 11 – Кабардинская впадина; 12 – грот Сарадж-Чуко.

средних высот. Обе террасы расщепляются и перекрыты чехлами покровных отложений. Так, выделенные здесь ранее [15, с. 88] террасы высотой 750/150 м (указываются абсолютная и относительная высоты) и 700/100 м являются локальными уровнями одной верхней террасы данного комплекса. Низкая терраса также имеет два уровня (660–670/60–70 м и 640–645/40–45 м). В результате общая глубина малкинского эрозионного вреза составляет примерно 160 м.

Кызбурунский террасовый комплекс (Q_3) низких террас представлен двумя аккумулятивными террасами, валунно-галечный аллювиальный чехол которых перекрыт покровными пролювиально-делювиальными щебнисто-глыбовыми и суглинистыми покровными отложениями мощностью местами до 10 м. Именно эти террасы заняты основной частью жилой застройки и огородами

с. Заюково. Часть сближенных низких террас, выделявшихся Г.И. Рейснером и Б.М. Богачкиным [15], является локальными террасами врезывания, которые только осложняют строение региональных террас.

Суммарная глубина двух эрозионных врезв Кызбурунского комплекса вряд ли превышает 30–35 м. Следовательно, она примерно в 5 раз меньше аналогичного эрозионного вреза Малкинского комплекса.

Голоценовый террасовый комплекс (Q_4) прирусловых террас слабо углублен в низкую террасу Кызбурунского комплекса. Его аллювий часто прислонен к верхнеэоплейстоценовому аллювию. Комплекс представлен низкой террасой и поймой с суммарной глубиной эрозионного вреза

Таблица 1. Относительные высоты четвертичных террас р. Баксан [15]

Относительные высоты террас в пунктах						Террасовые комплексы (тк)
Река Костанты	Река Гундален	Село Заюково	Село Кызбурун		Город Баксан	
			I	II		
		383	214	84	+	Сармаковский (Q _E)
		283	190	58	22	Кубинский (Q ₁)
		140–160	128	30	+	Малкинский (Q ₂)
170	154	100	31	+		
83	83	79				Кызбурунский (Q ₃)
	46					
24	40	28				
		22	16			
14		17	15			
12	13	11	8	6	5	

знак + означает, что терраса погрузилась

вряд ли большей 10 м. Это в 3–4 раза меньше эрозионного вреза Кызбурунского комплекса.

Таким образом, выделенные здесь разновозрастные региональные террасы по глубинам своих эрозионных врезов определенно группируются в разномасштабные террасовые комплексы.

Эти комплексы различаются и морфологически, формируя водораздел (Сармаковский комплекс), приводораздельный (Кубинский комплекс) и основной (Малкинский комплекс) склоны, а террасы Кызбурунского комплекса образуют здесь широкое днище долины р. Баксан, которое очень не-

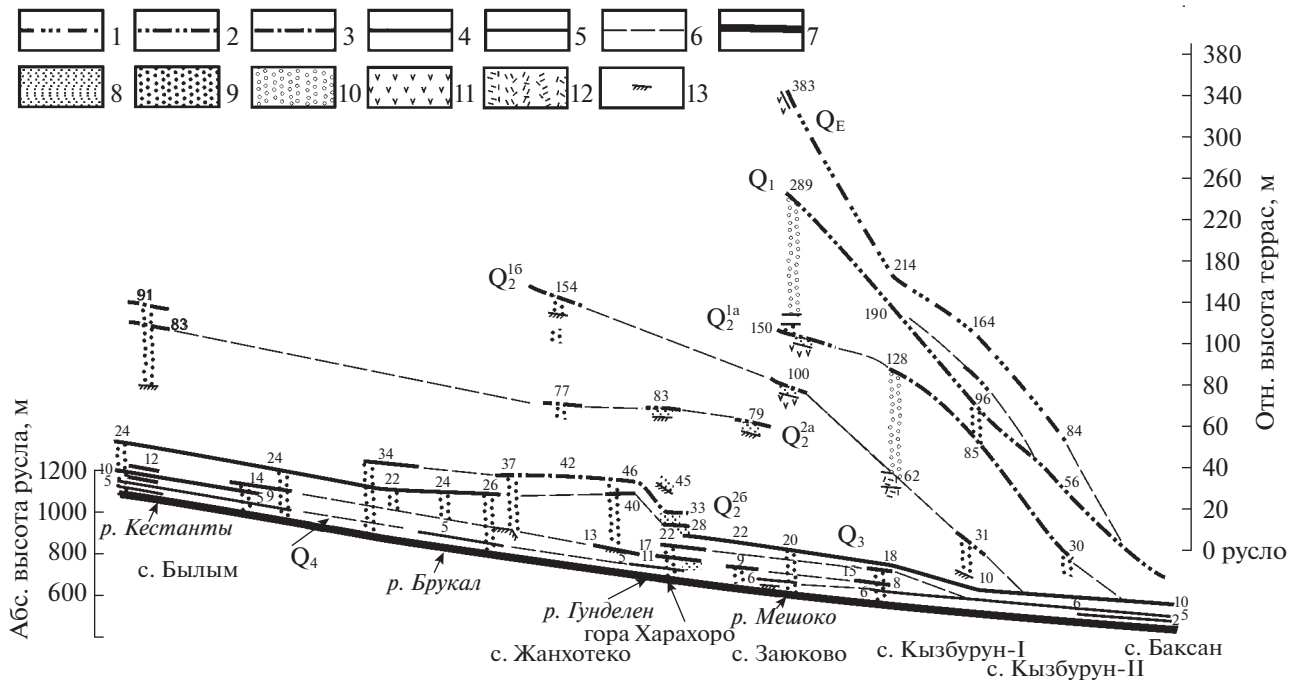


Рис. 3. Продольный профиль террас в долине р. Баксан (по [15] с дополнениями). 1–5 террасы: 1 — эоплейстоценовые; 2 — раннеоплейстоценовые; 3 — среднеоплейстоценовые; 4 — позднеоплейстоценовые; 5 — голоценовые; 6 — корреляционные линии; 7 — профиль русла; 8–10 — отложения, слагающие террасы: 8 — пески, 9 — галечники и валунники, 10 — валуно-галечные с включениями крупных глыб; 11–12 — отложения, слагающие цоколи террас: 11 — туфы и ингибиты (N₂³ак-Q_E), 12 — вулканогенно-пролювиальные осадки баксангэсской свиты (N₂³ак-ар); 13 — цоколи террас. Арабскими цифрами обозначены относительные высоты террас и цоколей.

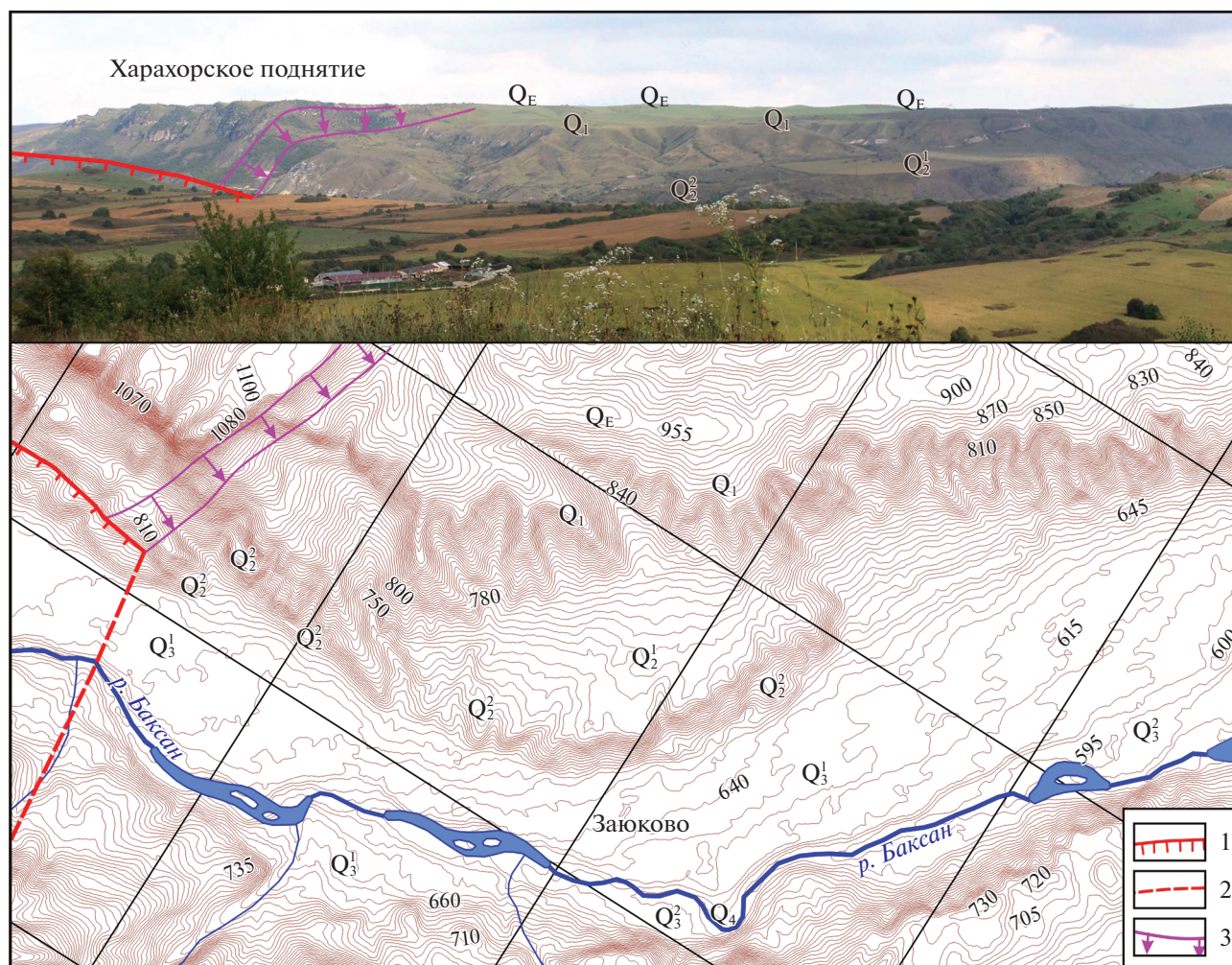


Рис. 4. Фотопанорама и топооснова района с. Заяуково с элементами четвертичного террасового ряда на левобережье р. Баксан. 1–3 – новейшие разрывные структуры: 1 – сбросы, 2 – погребенные сбросы, 3 – флексуры.

значительно углубляется узким извилистым врезом прируслового Голоценового комплекса.

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ТЕРРАСОВОГО РЯДА УЩЕЛЬЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕРРАСОВЫХ РЯДОВ БАКСАНА И ФАНДУКО

Рассмотренный выше четкий террасовый ряд р. Баксан наблюдается только на ее левобережье. На правобережье присутствие локальных разрывов и флексур осложняет строение северного склона водораздела между Баксаном и Фандуко. Поэтому здесь невозможно дать прямое графическое сопоставление террасовых рядов Баксана и Фандуко. В этом случае придется опираться на сопоставление комплексов террас, а при таком сопоставлении нужно будет учитывать, что по отношению к этому водоразделу суммарная глубина эрозионного вреза р. Фандуко более чем в 2.5 раза меньше подобной глубины р. Баксан.

Грот Сарадж-Чуко располагается в нижней части глубокого (глубиной почти до 200 м) ущелья р. Фандуко, которое врезано в вулканогенные плиоцен-палеоплейстоценовые образования, формирующие залегающий на водоразделах покров мощностью до 250 м. Ниже по течению реки под этим покровом обнажаются олигоценые карбонатные глины и мергели.

Большая крутизна и залесенность левого борта каньонобразной долины Фандуко не позволили непосредственно составить ее профиль с помощью геодезических измерений. Такие измерения доступны только в прирусловой части этого склона, на водоразделе и в районе локального притока данной долины.

Дополнительный материал по выявлению террасовых элементов левобережья р. Фандуко был получен с помощью двух профилей GPS-измерений. Следует отметить, что трассы этих профилей близки, но не совпадают. Поэтому несколько раз-

Таблица 2. Террасовые комплексы р. Баксан у с. Зауково

Террасовые комплексы		Относительная высота аккумулятивного чехла (м)	Глубина эрозионного вреза (м)	
Сармаковский (Q _E)		380		
Кубинский (Q ₁)		280	180	
Малкинский (Q ₂)	Q ₂ ¹	Q ₂ ^{1a}	80	160
		Q ₂ ^{1б}	100	
	Q ₂ ²	Q ₂ ^{2a}	80	80
		Q ₂ ^{2б}	40	
Кызбурунский (Q ₃)	Q ₃ ¹	20–24	30–35	
	Q ₃ ²	12–14		
Голоценовый Q ₄		5	до 10	

личается и морфология рельефа, отраженного на соседних профилях GPS-измерений. Кроме того, эти профили выходят на водораздел в разных местах, а потому заканчиваются на разной высоте.

Нижняя часть склона представлена также по геодезическим данным (третий профиль). Суммирование всех полученных результатов геодезических и GPS измерений позволяет наметить ос-

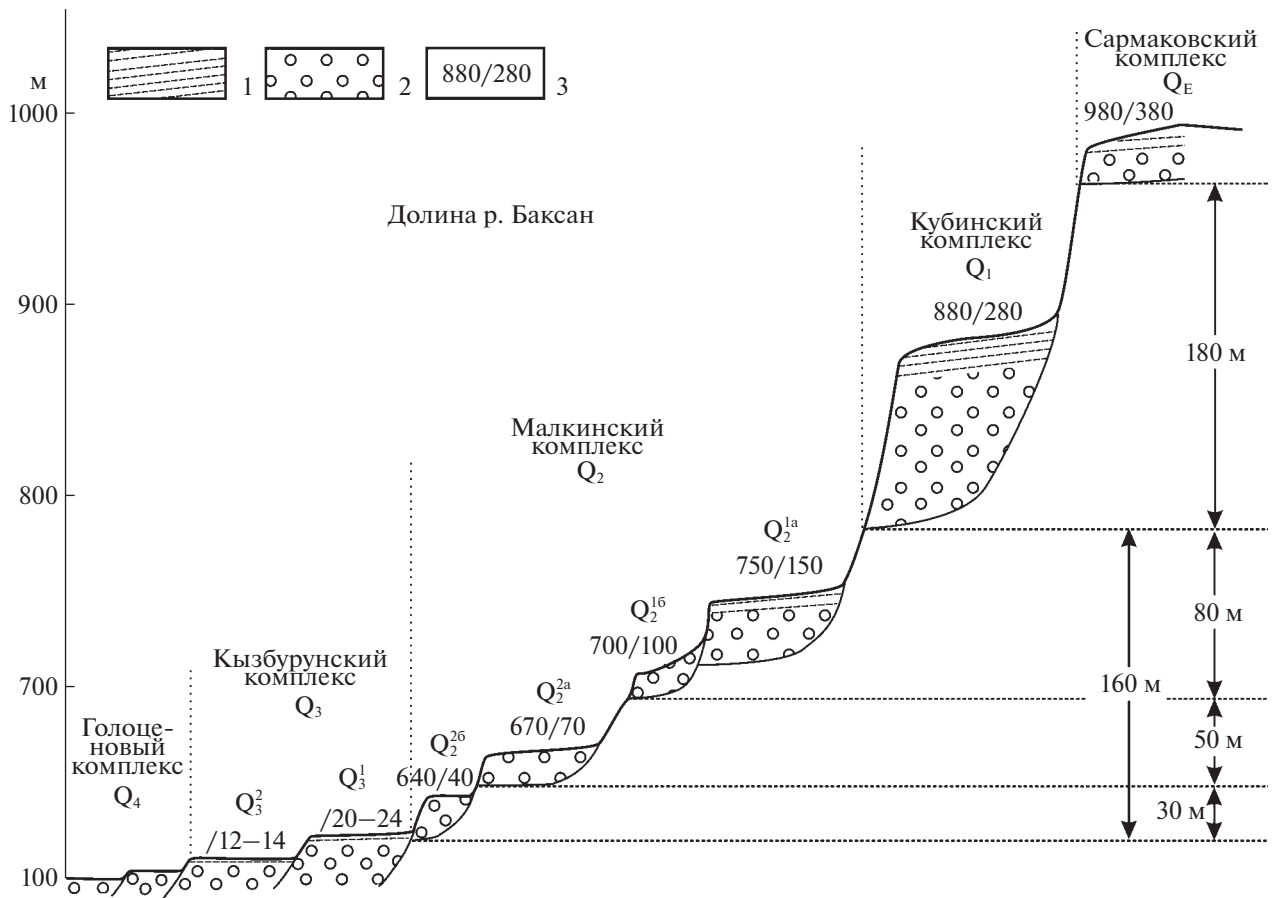


Рис. 5. Принципиальная схема террасового ряда долины р. Баксан у с. Зауково. 1 – покровные отложения, 2 – аллювиальные отложения, 3 – абсолютные/относительные высоты террасовых поверхностей в метрах.

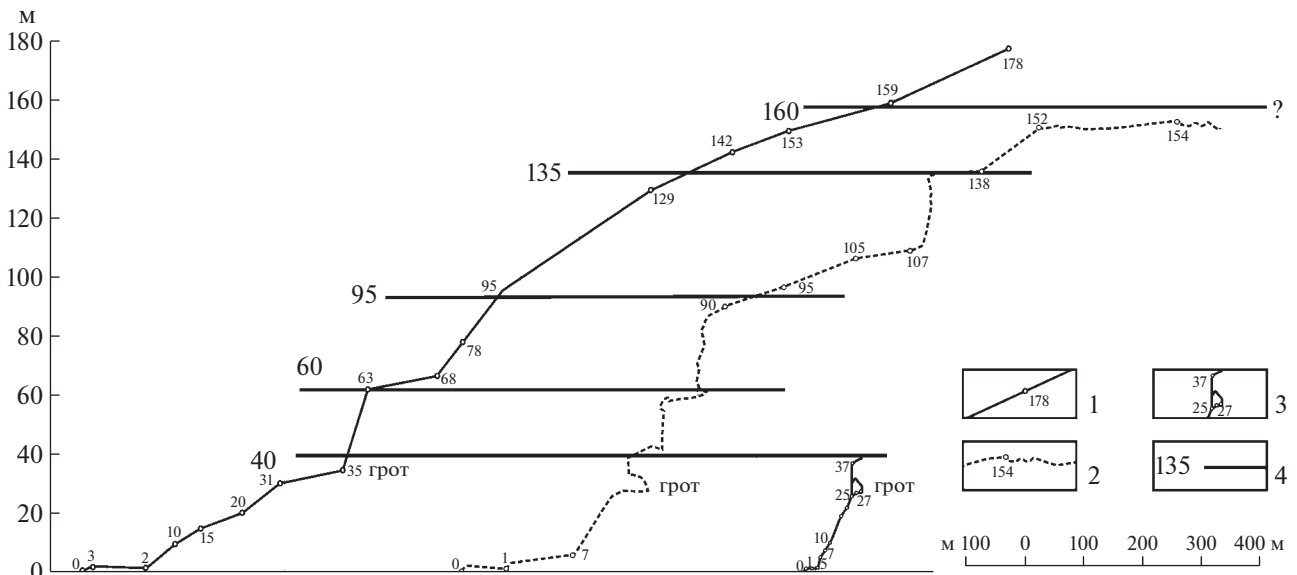


Рис. 6. Суммарный результат геодезических и GPS измерений левого борта р. Фандуко в районе грота Сарадж-Чуко. 1–3 – линии и точки измерений: 1 – GPS 2017 г., 2 – GPS 2018 г., 3 – геодезических измерений 2018 г., 4 – условные линии геоморфологических уровней.

новые перегибы склона и выявить элементы, отвечающие днищам эрозионных палеоврезов. Эти днища с относительными высотами над руслом р. Фандуко примерно 40, 60, 95 и 135 м рассматриваются в качестве основных геоморфологических (террасовых) уровней (рис. 6).

Рассмотренные выше материалы были дополнены геодезическими исследованиями по террасированию водораздельной территории. Как известно, основные водораздельные перегибы обычно достаточно надежно сопрягаются, по крайней мере, с верхними террасовыми уровнями на бортах долин [11]. При этом они располагаются субпараллельно верхнему водораздельному уровню и уклону речного русла. Такие соотношения нашли отражение на водораздельном профиле и на профиле левого борта р. Фандуко (рис. 7).

В данном случае верхний водораздельный уровень, фиксирующий кровлю Нижнегегемской вулканогенной толщи ($N_2^2-Q_P$), скорее всего, формировался в эпоху накопления кызбурунской и баксангэсской толщ. Поэтому он не может быть древнее конца палеоплейстоцена. Соответственно, следующий эрозионный врез, также, как и в долине р. Баксан, очевидно, отвечает здесь эоплейстоценовому Сармаковскому террасовому комплексу (Q_E).

На профиле видно, что Кубинский (Q_1) эрозионный врез в долине р. Фандуко глубже Сармаковского (Q_E) – 40 м против 25 м. Это, очевидно, отражает ускорение орогенических воздыманий, характерное для начала неоплейстоцена [9–11].

Ниже, как и в долине р. Баксан, наблюдается сдвоенный врез ранней части Малкинского террасового комплекса ($Q_2^{1a,b}$), а еще ниже располагается крупный врез, в котором находится грот Сарадж-Чуко.

На рассматриваемом рисунке видно также, что в продольном профиле русла р. Фандуко наблюдаются перегибы, характерные для “законсервированных” верховьев рек, русла которых последовательно спускаются с более древнего уровня на более молодой. Корреляция этих молодых геоморфологических уровней показывает, что их глубины существенно меньше глубин более древних врезов. Такие соотношения характерны для образований Малкинского и Кызбурунского террасовых комплексов.

Следовательно, эрозионный врез, в котором располагается грот, относится к молодому элементу Малкинского террасового комплекса (Q_2^2). Соответственно, встречающиеся в районе грота Сарадж-Чуко маломощные молодые аккумулятивные террасовые и склоновые образования располагаются на практически неперуглубленном эрозионном врезе поздней части Малкинского комплекса (Q_2^2).

Поскольку устье грота Сарадж-Чуко находится на относительной высоте 26 м (высота нулевой линии археологической документации в гроте), он располагается в средней части поздне-Малкинского (Q_2^2) эрозионного вреза, имеющего глубину около 40 м [3].

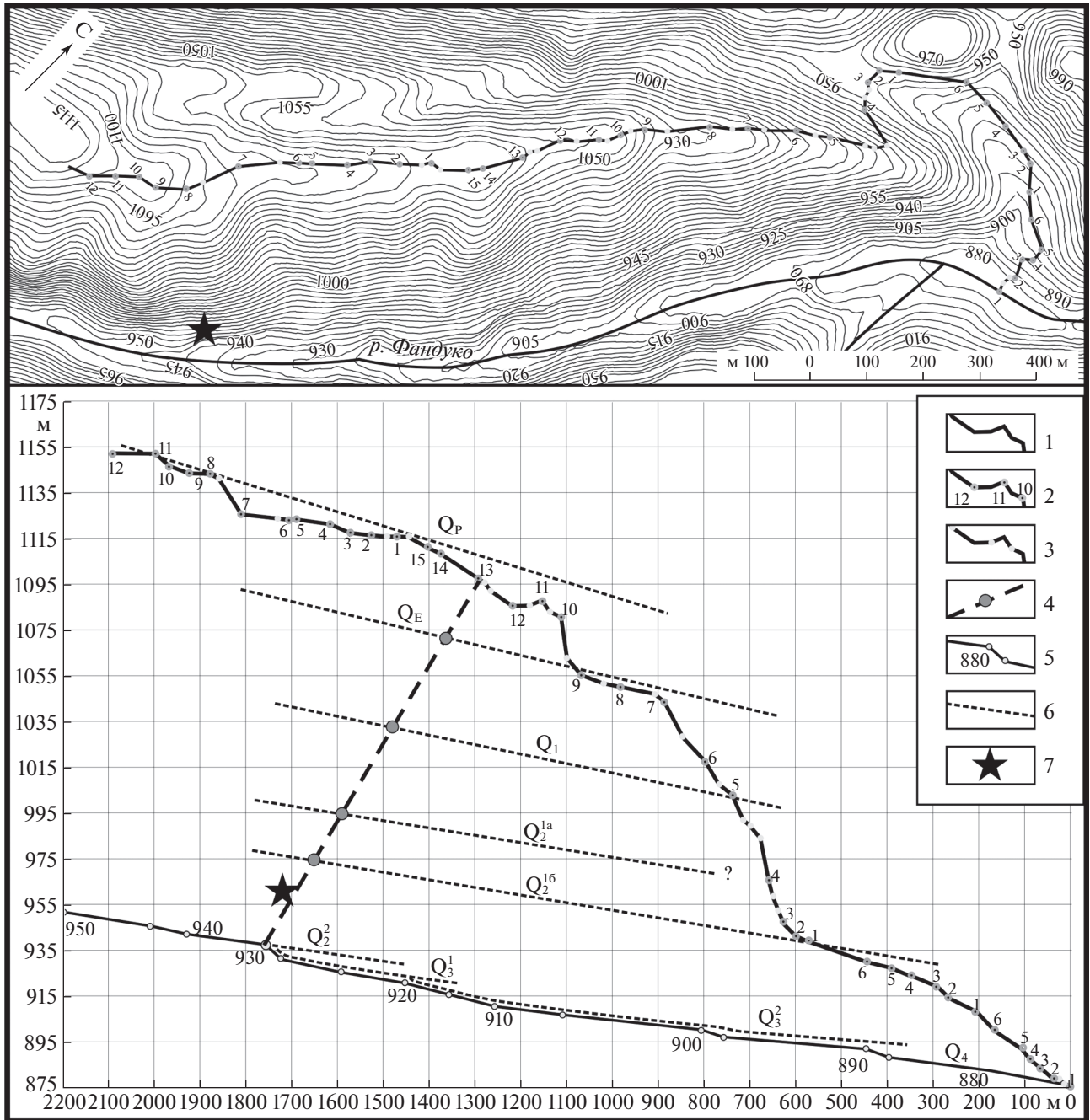


Рис. 7. Результаты геодезического хода на водоразделе и склоне левого борта р. Фандуко и корреляция геоморфологических уровней водораздела и левобережья р. Фандуко. 1 – линия геодезического хода, 2 – точки теодолитных станций, 3 – промежуточные точки, 4 – суммарный поперечный профиль (см. рис. 6), 5 – профиль русла р. Фандуко по данным топографической карты, 6 – корреляционные линии дниц разновозрастных эрозионных врезов, 7 – грот Садж-Чуко.

Проведенные исследования показывают, что изучение террасового ряда ущелистых долин не должно ограничиваться единичным поперечным сечением. Надежные результаты могут быть получены при обследовании нескольких подобных сечений, дополненных анализом продольного профиля русла. В идеале необходимо изучить весь интервал ущелистой долины от исследуемого

объекта вниз по реке до выхода ее из ущелья (до устья ущелья).

ВОЗРАСТНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ

В данном случае для достижения более надежного датирования выделенных подразделений приходится использовать региональные и межрегиональные корреляции.

Таблица 3. Сопоставление плейстоценовых террасовых комплексов долин рек Подкумка и Баксана

р. Подкумок	Индексы	р. Баксан
Армянский	Q _E	Сармаковский
Ессентукский	Q ₁	Кубинский
Джамгатский	Q ₂	Малкинский
Пятигорский	Q ₃	Кызбурунский
Голоценовый	Q ₄	Голоценовый

Региональные корреляции

Расчленение неоплейстоцена обширного региона Северного Кавказа, в котором находится р. Фандуко, опирается на корреляцию террасовых рядов основных речных долин. Датировка этих рядов в свою очередь традиционно базируется на фаунистически охарактеризованном террасовом ряде р. Подкумок [4, 5, 13, 15].

В нем выделяются Армянский (Q_E), Ессентукский (Q₁), Джамгатский (Q₂), Пятигорский (Q₃) и голоценовый (Q₄) террасовые комплексы, представленные различным количеством террас, но достаточно определенно коррелирующиеся с подразделениями баксанской схемы (табл. 3).

Датировки комплексов опирались на следующие основные данные.

В *Армянском комплексе*, включающем пять террас, датирована Лысогорская терраса, которая имеет высоты: напротив ст. Константиновской — 88 м, у ст. Лысогорской — 120 м, у ст. Незлобной — 63 м. Из ее аллювия Л.И. Алексеева и Э.А. Вангенгейм определили остатки (зуб и бивень) *Anapcus arvernensis* (St. et Job.) с возрастным интервалом существования киммерийский-апшеронский регионарус, позднее — Л.И. Алексеевой — остатки (челюсть) *Archidiscodon meridionalis* Nesti. — апшеронский регионарус [15, с. 27]. С учетом некоторых дополнительных корреляционных материалов данная терраса считается верхнеапшеронской [15, с. 28], т.е. эоплейстоценовой. С этим комплексом сопоставляется травертиновый поток на северном склоне г. Машук (Лермонтовский холм), содержащий на высоте 180 м над урезом Подкумка остатки *Elephas meridionalis* Nesti и имеющий абсолютную датировку (по методу неравновесного урана) 1.25 млн лет [15, с. 29].

Нижняя терраса с относительными высотами у Пятигорска 100–110 м относилась к данному комплексу условно [15, с. 33]. Ее целесообразно перенести в ранненеоплейстоценовый Ессентукский комплекс, поскольку несколько более молодой травертиновый поток на восточном склоне горы Машук в своей средней части содержит остатки *Elephas aff. antiquus* Falk., формы, характерной для начала-середины миндель-рисса [15, с. 31],

т.е. скорее всего для начала среднего неоплейстоцена.

Непосредственно *Ессентукский комплекс* был представлен одной террасой, условно датированной ранним неоплейстоценом и находящейся по своему стратиграфическому положению между Армянским (апшеронским) и Джамгатским (средненеоплейстоценовым) комплексами.

Джамгатский комплекс также представлен одной террасой, на тесную связь с которой третьего травертинового потока на северо-восточном склоне горы Машук указывают многие исследователи. В этом травертиновом потоке содержатся многочисленные остатки млекопитающих, преимущественно *Cervus ex gr. elaphus* Lin., датированных интервалом с миндель-рисса по рисс-вюрм [15, с. 32]. На этом основании большинство исследователей считают данный комплекс средне-неоплейстоценовым [15, с. 34].

Пятигорский комплекс представлен несколькими террасами. Травертиновый поток южного склона г. Машук и Горячей горы, спускающийся с высоты 155 м до высокой поймы, запечатывает разновозрастные средне- и верхненеоплейстоценовые террасы Подкумка высотой 23 и 12 м. Из данных травертинов известна находка зубов позднечетвертичной формы *Equus* (*Equus*) sp. [15, с. 32].

Голоценовый комплекс представлен обычно высокой (3–5 м) и низкой (0.5–2.5 м) поймами.

Проведенные региональные корреляции, очевидно, определяют только самые общие возрастные рамки выделяемых террасовых комплексов. Поэтому для получения более детальных абсолютных датировок желательнее провести возможные межрегиональные корреляции.

Межрегиональные корреляции

Четвертичные стратиграфические подразделения, описанные выше на Центральном Кавказе, с учетом соотношения глубин разновозрастных эрозионных врезов, принципиально аналогичны выделявшимся ранее на Западном Кавказе [10, 8, 11]. Это обстоятельство позволяет использовать для Баксанского террасового ряда материалы по абсолютному датированию, полученные и для Западнокавказского террасового ряда. В последнем речные террасовые ряды северного и южного склонов Большого Кавказа сопоставлены с морским террасовым рядом Черного моря и на основании всего комплекса местных и корреляционных материалов получили более определенную абсолютную возрастную датировку (табл. 4). Эти данные могут быть использованы для характеристики возраста грота Сарадж-Чуко.

Таблица 4. Абсолютный возраст и продолжительность этапов рельефообразования

Этапы рельефообразования					Возрастные индексы	Возраст рубежей	Продолжительность этапов рельефообразования		
Центральный Кавказ	Западный Кавказ						Тыс. лет		
Баксанский район	Северный склон		Южный склон						
“Голоценовый” Q_4	Кубанский		Молдовско-Новоэксинский		Q_4	15–20	15–20		
Кызбурунский Q_3	Q_3^2	Гирейский	Майкопский	Хостинский	Роцинско-Агойский	Q_3	Q_3^2	100	50
								Вюшатский	Воронцовско-Шахейский
Малкинский Q_2	Q_2^2	Гулькевичский	Хаджохский	Мзымтинский	Липниковско-Ашейский	Q_2	Q_2^2		
								Курджипский	Голицинско-Пшадский
Кубинский Q_1	Воздвиженский	Монастырско-Чаудинский	Q_1	700–800	400				
						Сармаковский Q_E	Эоплейстоценовый (“апшеронский”)	Q_E	1800

ОЦЕНКА ВОЗРАСТА АНАЛИЗИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

В качестве возраста грота в данном случае учитывается время вскрытия речной эрозией подземной пещерной полости. Этот возраст, очевидно, может рассматриваться как максимально ранний для освоения грота древним человеком.

Допуская единство основных этапов рельефообразования для всего Большого Кавказа, можно использовать полученные абсолютные датировки для характеристики этапов формирования долины р. Фандуко. Соответственно, эрозионно-аккумулятивный цикл (Q_2^2), вскрывший погребенную пещерную полость грота Сарадж-Чуко, заключен в интервале от 150–200 тыс. лет до 110–120 тыс. лет назад.

Это вскрытие произошло в середине эрозионной фазы данного цикла, охватывающей обычно от 1/4 до половины продолжительности цикла [9, 11]. Малая мощность водотока р. Фандуко свидетельствует в пользу максимальной продолжительности этой эрозионной фазы, развивавшейся соответственно примерно до 135 тыс. лет назад.

Поскольку устье грота Сарадж-Чуко расположено в середине данного эрозионного вреза, можно с определенной вероятностью допустить, что вскрытие речной эрозией первичной пещерной полости произошло не позднее интервала порядка 145–140 тыс. лет назад. Необходимо также учесть определенное время, необходимое для окончательного формирования полости грота¹. Это формирование включает зафиксированные в гроте следы обрушения свода, десквамации и пе-

¹ Вулканогенная природа первичной подземной полости была рассмотрена ранее [3].

щерно-аллювиальной эрозии, активизировавшиеся под начавшимся воздействием атмосферных факторов [3].

Тем не менее выявленное в настоящее время начало заселения данного грота, оцениваемое по археологическим данным интервалом от 100 до 70 тыс. лет назад, произошло несколько позже его проявления и оформления в рельефе. Не исключена, следовательно, вероятность обнаружения следов более раннего посещения человеком данного грота.

В палеоэкологическом отношении проведенные исследования показывают, что строение долины р. Фандуко в районе стоянки Сарадж-Чуко практически не менялось, начиная с конца Малкинского этапа (Q_2^2), т.е. стабилизировалось еще до начала заселения грота.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше материалы показали, что применение оротектонического метода позволяет предложить описанную выше оригинальную методику выявления этапов формирования горных ущелий.

Рассмотренный в составе данной методики комплекс геолого-геоморфологических и корреляционных исследований может эффективно использоваться при изучении истории формирования ущелистых речных долин в активных оротектонах типа Кавказа и Тянь-Шаня.

Предложенная методика полезна для проведения палеоэкологических реконструкций, которые могут привлекаться, например, при археологических исследованиях и инженерно-геологических изысканиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев Г.Д., Иванов И.Б., Шанин Л.Л.* К-Аг данные о новейшем гранитном магматизме // Известия АН СССР. Сер. геологическая. 1964. № 6. С. 3–9.
2. *Борисов Б.А.* О дальнейшем усовершенствовании общей шкалы квартера для детализации карт четвертичных отложений, входящих в комплекты госгеолкарты РФ // Общая стратиграфическая шкала России: состояние и проблемы обустройства: ГИН РАН. 2013. С. 365–375.
3. Грот Сарадж-Чуко в Приэльбрусье (результаты междисциплинарных исследований 2017–2019 гг.) / Кол. авт.: *Е.В. Доронищева, Л.В. Голованова, В.Б. Доронищев и др.* СПб.: Изд-во РИПОЛ классик, 2020. 408 с.
4. *Иванова И.К.* Материалы к стратиграфии травертинов горы Машук в окрестностях Пятигорска // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1946. Т. 21. Вып. 5. С. 21–44.
5. *Иванова И.К.* О возрасте травертинов горы Машук и их особенностях с террасами Подкумка (окрестности Пятигорска) // Бюлл. КИЧП. 1947. № 9. С. 36–47.
6. *Милановский Е.Е., Короновский Н.В.* Нижнекавказский вулканический район (Северный Кавказ) // Вестник МГУ. Сер. геол. 1969. № 4. С. 15–28.
7. *Несмеянов С.А.* Генетические комплексы континентальных отложений. М.: Книга и Бизнес, 2012. 397 с.
8. *Несмеянов С.А.* Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 392 с.
9. *Несмеянов С.А.* Корреляция континентальных толщ. М.: Недра, 1977. 198 с.
10. *Несмеянов С.А.* Неоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий). М.: Недра, 1992. 254 с.
11. *Несмеянов С.А.* Оротектонический метод. М.: ООО “Миттель Пресс”, 2017. 376 с.
12. *Несмеянов С.А., Воейкова О.А.* Локальные неотектонические перестройки структур в орогене Северного Кавказа // Геоэкология. № 2. 2019. С. 3–12.
13. *Николаев Н.И.* О возрасте рельефа Центрального Кавказа и Предкавказья // Тр. МГРИ. Т. 23. 1948. С. 154–178.
14. *Ранов В.А., Несмеянов С.А.* Палеолит и стратиграфия антропогена Средней Азии Душанбе: “Дониш”, 1973. 152 с.
15. *Рейснер Г.И., Богачкин Б.М.* Стратиграфия и тектоника антропогена Центрального Предкавказья. М.: ИФЗ, 1989. 196 с.
16. *Тесаков А.С., Шик С.М., Величко А.А., Гладенков Ю.Б., и др.* Новые предложения по Общей стратиграфической шкале четвертичной системы // Бюлл. КИЧП. 2014. № 73. С. 13–15.
17. Типы магм и их источники в истории Земли. Ч. 1. Магматизм и геодинамика – главные факторы эволюции Земли / Богатиков О.А. и др. Гл. ред.: О.А. Богатиков и В.И. Коваленко. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 398 с.

METHODOLOGY OF IDENTIFYING THE FORMATION STAGES FOR RIVER VALLEY GORGES IN ACTIVE OROGENS

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

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

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

The proposed procedure of identifying the formation stages for mountain gorges is based on the use of orotectonic method. It permits revealing the schemes of different-scale erosion-accumulation cycles in the gorge and in the adjacent valley of a large river. These schemes are compared with each other. To date the identified stages, they are successively correlated with local and regional stratigraphic schemes. The proposed complex of geological, geomorphological and correlation studies can be used to study the history of the formation of gorge river valleys in active orogens such as the Caucasus and Tien Shan. It may be helpful for paleoenvironmental reconstructions in archaeological research and geotechnical surveys.

Keywords: *gorge, river valley, erosion-accumulative cycle, terrace, terrace row, orogen*

REFERENCES

1. Afanas'ev, G.D., Ivanov, I.B., Shanin, L.L. *K-Ar dan-nye o noveishem granitnom magmatizme* [K-Ar data on the latest granite magmatism]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1964, no. 6, pp. 3–9. (in Russian)
2. Borisov, B.A. *O dal'neishem usovershenstvovanii obshchei shkaly kvartera dlya detalizatsii kart chetvertichnykh otlozhenii, vkhodyashchikh v komplekty gosgeolkarty RF* [On the development of the general scale for detailing the maps of Quaternary deposits included in the sets of the State Geological Map of the Russian Federation]. *Obshchaya stratigraficheskaya shkala Rossii: sostoyaniye i problemy* [General stratigraphic chart of Russia: state and problems]. Moscow, GIN RAN, 2013, pp. 365–375. (in Russian)

3. *Grot Saradzh–Chuko v Priel’brus’e (rezul’taty mezhdisciplinarnykh issledovaniy 2017–2019 gg.)* [Saradzh–Chuko Grotto in the Elbrus region (results of interdisciplinary research 2017–2019)]. Doronicheva, E.V., Golovanova, L.V., Doronicheva V.B. et al. St. Petersburg, RIPOI Classic Publ., 2020, 408 p. (in Russian)
4. Ivanova, I.K. *Materialy k stratigrafii travertinov gory Mashuk v okrestnostyakh Pyatigorsk* [Materials for the stratigraphy of the Mashuk travertines in the vicinity of Pyatigorsk]. *Bull. MOIP. Otd. geol.*, 1946, vol. 21, issue 5, pp. 21–44. (in Russian)
5. Ivanova, I.K. *O vozraste travertinov gory Mashuk i ikh osobennostyakh s terrasami Podkumka (okrestnosti Pyatigorsk)* [On the age of travertines of Mount Mashuk and their features with Podkumka terraces (near Pyatigorsk)]. *Bull. KICHP*, 1947, no. 9, pp. 36–47. (in Russian)
6. Milanovskii, E.E., Koronovskii, N.V. *Nizhnechegemskii vulkanicheskii raion (Severnyi Kavkaz)* [Nizhnechegemsky volcanic region (the Northern Caucasus)]. *Vestnik MGU, ser. geol.*, 1969, no. 4, pp. 15–28. (in Russian)
7. Nesmeyanov, S.A. *Korrelyatsiya kontinental’nykh tolsh* [Correlation of continental strata]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 144 p. (in Russian)
8. Nesmeyanov, S.A. *Geneticheskie komplekсы kontinental’nykh otlozhenii* [Genetic complexes of continental deposits]. Moscow, Kniga i Biznes Publ., 2012, 397 p. (in Russian)
9. Nesmeyanov, S.A. *Geomorfologicheskie aspekty paleoekologii gornogo paleolita (na primere Zapadnogo Kavkaza)* [Geomorphological aspects of the paleoecology of the mountain paleolithic (on the example of the Western Caucasus)]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1999, 392 p. (in Russian)
10. Nesmeyanov, S.A. *Neostrukturnoe raionirovanie Severo-Zapadnogo Kavkaza (operezhayushchie issledovaniya dlya inzhenernykh izyskaniy)* [Non-structural zoning of the North-West Caucasus (leading research for engineering surveys)]. Moscow, Nedra Publ., 1992, 254 p. (in Russian)
11. Nesmeyanov, S.A. *Orotektonicheskii metod* [Orotectonic method]. Moscow, Mittel’ Press Publ., 2017, 376 p. (in Russian)
12. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A. *Lokal’nye neotektonicheskie perestroiki struktur v orogene Severnogo Kavkaza* [Local neotectonic rearrangements of structures in the orogen of the North Caucasus]. *Geoekologiya*, 2019, no. 2, pp. 3–12. (in Russian)
13. Nikolaev, N.I. *O vozraste rel’efa Tsentral’nogo Kavkaza i Predkavkaz’ya* [On the age of the relief of the Central Caucasus and Ciscaucasia]. *Trudy MGRI*, 1948, vol. 23, pp. 164–178. (in Russian)
14. Ranov, V.A., Nesmeyanov, S.A. *Paleolit i stratigrafiya antropogena Srednei Azii* [Paleolithic Age and stratification of Anthropogene of Middle Asia]. Dushanbe, Donish Publ., 1973, 162 p. (in Russian)
15. Reisner, G.I., Bogachkin, B.M. *Stratigrafiya i tektonika antropogena Tsentral’nogo Predkavkaz’ya* [Stratigraphy and tectonics of Anthropogene in the Central Ciscaucasia]. Moscow, IFZ RAN, 1989, 196 p. (in Russian)
16. Tesakov, A.S., Shik, S.M., Velichko, A.A., Gladnikov, Yu.B., et al. *Novye predlozheniya po Obshchei stratigraficheskoi shkale chetvertichnoi sistemy* [New proposals for the General Stratigraphic Scale of the Quaternary System]. *Bull. KICHP*, 2014, no. 73, pp. 13–15. (in Russian)
17. *Tipy magm i ikh istochniki v istorii Zemli. Ch. 1. Magmatizm i geodinamika – glavnye faktory evolyutsii Zemli* [Types of magmas and their sources in the history of the Earth. Part 1. Magmatism and geodynamics as the main factors in the Earth evolution]. O.A. Bogatkov, V.I. Kovachenko (Eds.), Moscow, IGEM RAN, 2006, 398 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.543

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА И ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕОПАСНОГО МАССИВА

© 2022 г. Г. П. Постоев^{1,*}, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 17.04.2022 г.

Принята к публикации 20.04.2022 г.

Напряжения в точках массива определяются и распределяются по закону Кулона–Мора в главных напряжениях, в условиях компрессионного сжатия. Влияние склона и развитие склоновых процессов вызывают в массиве, в соответствии с процессами диссипации, снижение напряжений в точках. Результаты экспериментальных исследований (лабораторных, стендовых и натуральных) свидетельствуют, что закономерные процессы снижения напряжений в точках массива вызывают деформации грунтов уже на допредельном этапе состояния массива. Но они могут быть причиной образования трещин в несущих конструкциях сооружений и возникновения опасных неравномерных осадок их фундаментов.

Ключевые слова: закон Кулона–Мора, напряженно-деформированное состояние, диссипация, боковой распор, снижение напряжений, лабораторные, стендовые и натурные испытания, склоновые процессы, осадка массива

DOI: 10.31857/S0869780922040063

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими задачами геоэкологии, инженерной геологии и механики грунтов являются: выявление условий безопасного освоения исследуемых территорий, в частности своевременное предупреждение о подготовке разрушительных деформационных процессов в грунтовых массивах (оползни, карстовые провалы и др.), обоснование допустимых осадок основания зданий и сооружений, прогнозирование условий исчерпания несущей способности основания и нарушения устойчивости проектируемых и существующих сооружений. В настоящее время расчеты напряженно-деформированного состояния исследуемых грунтовых массивов производятся на основе математического аппарата теории упругости. Однако одно из основных условий применения теории упругости к грунтам – прямая пропорциональность между их деформациями и действующими напряжениями в допредельном состоянии. Вместе с тем основные деформации в массиве начинаются, когда состояние грунтов (в условиях компрессионного сжатия и распределения напряжений по Кулону–Мору) в локальной зоне силового возмущения (зоне влияния склона) приближается к предельному. В связи с этим необходим переход от рассмотрения прочности грунта и напряжений в точке к оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) в указанной

зоне, например, вследствие разгрузки напряжений по законам диссипации [7] в оползнеопасном коренном массиве, вызванной развитием в нем деформаций.

Ниже рассматриваются механизм и закономерности изменения НДС в точках оползнеопасного коренного массива (в зоне границы со склоном) на этапе сохранения его устойчивости и отсутствия оползневых деформаций в коренных грунтах.

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА ДЛЯ ГРУНТА В ОБРАЗЦЕ

Условием прочности грунта по Кулону–Мору является выражение:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения.

Выражение (1) может быть преобразовано в уравнение [5]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где σ_{str} – структурная прочность грунта.

Из (2) следует, что при $\sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_{str}$, а при $\sigma_1 > \sigma_{str}$ имеет место прямая пропорциональность между σ_3 и $(\sigma_1 - \sigma_{str})$ в условиях отсутствия поперечных деформаций.

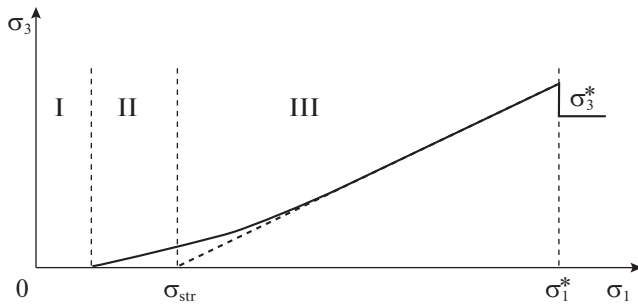


Рис. 1. Диаграмма бокового распора и фазы работы глинистого грунта в компрессионных условиях (по Е.И. Медкову).

Физически структурная прочность грунта на сжатие соответствует предельному давлению, которое может выдержать структурный каркас грунта без разрушительных деформаций. Графически структурная прочность отсекается на оси абсцисс диаграммы Мора предельным кругом Мора, проходящим через начало координат, т.е. как и из (2) при $\sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_{str}$. При $\sigma_1 \leq \sigma_{str}$ прочность структурных связей сохраняется (для $\sigma_1 = \sigma_{str}$ она полностью отобработана).

Экспериментально структурная прочность σ_{str} может быть определена при испытаниях грунта на одноосное сжатие — как предельное давление на образец грунта; или по диаграмме бокового распора при испытаниях на стабилометре М-2, в соответствии с методикой, разработанной профессором Е.И. Медковым [4].

Уравнения (1), (2) определяют, что грунт “раздавливается” вертикальным давлением, но находится в условиях компрессии (невозможности боковых деформаций). Активные горизонтальные (боковые) главные напряжения распора (напора) уравновешены равными им напряжениями отпора. Могут иметь место деформации уплотнения под вертикальной сжимающей нагрузкой. Но реально эти деформации возможны лишь при условии:

$$\sigma_1 > \sigma_{str} \quad (3)$$

Условие (3) означает, что структурная прочность преодолена, и при дальнейшем росте вертикального давления грунт в данной точке (образце) ведет себя как пластическое тело: между приращениями вертикального и горизонтального напряжений соблюдается прямая пропорциональность. Это означает, что и связные глинистые грунты, и полускальные, и скальные при соответствующих давлениях на грунт, согласно (2), приобретают общие закономерности формирования НДС [6].

Согласно исследованиям П.А. Ляшенко [3], в компрессионном испытании при $\sigma_1 > \sigma_{str}$ грунт дробится на множество клиньев. И в штамповых испытаниях образуются подобные же клинья, плотно прилегающие друг к другу. Образовавшиеся клинья трансформируют связный грунт в

дисперсный несвязный материал, для которого характерны пластические деформации, а при недопущении боковых деформаций возникает линейная зависимость между наибольшим (за минусом структурной прочности грунта) и наименьшим главными напряжениями.

Таким образом, структурная прочность является важнейшей характеристикой грунта, определяющей сопротивление внешнему давлению структурных связей между частицами грунта существующего структурного каркаса. В этой связи проявляется общность между связными и скальными грунтами, имея в виду, что

$$\sigma_{str} = R_c \quad (4)$$

где R_c — предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов [6].

При одноосном сжатии, когда вертикальное (осевое) давление на грунт σ_1 превысит R_c , происходит деформирование структуры грунта, растрескивание, разделение на отдельные агрегаты и разрушение образца.

Процесс сжатия грунта в условиях невозможности боковых деформаций с измерением вертикального и бокового давления исследован (рис. 1) профессором Е.И. Медковым [4].

Е.И. Медков выделил три характерные фазы при сжатии глинистого грунта:

I — вертикальные (осевые) напряжения σ_1 ниже предела упругости. Наблюдаются упругие вертикальные деформации грунта, боковой распор σ_3 отсутствует;

II — может появиться плавный рост бокового распора (для пластичных грунтов). В грунтах с жесткими связями σ_3 в этой фазе практически отсутствует; кроме упругих деформаций в данной фазе возникают также локальные упругопластические сдвиги, особенно при приближении к предельным давлениям;

III — характеризуется линейной зависимостью между приращениями вертикального давления и бокового распора в компрессионном испытании образца грунта и при незначительном снижении σ_3 возникают пластические деформации, и затем по достижении $\sigma_3 = \sigma_3^*$ (при $\sigma_1^* = \text{const}$, см. рис. 1) происходит разрушение грунта.

В сыпучих грунтах структурная прочность практически отсутствует и соотношение между σ_1 и σ_3 соответствует фазе III, что следует также из критерия Кулона–Мора (3) при $\sigma_{str} = 0$.

Таким образом, **основные закономерности**, вытекающие из закона Кулона–Мора, для грунта в образце заключаются в следующем:

— закон определяет сжатие грунта в условиях компрессии, закономерности изменения главных напряжений в соответствии с исходной прочностью грунта;

— закон позволяет определить предел структурной прочности грунта в соответствии с исход-

ными значениями характеристик прочности грунта φ , c :

$$\sigma_{str} = 2c \cdot \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (5)$$

т.е. $\sigma_{str} = \sigma_1$ при $\sigma_3 = 0$;

– между приращениями осевого σ_1 и бокового σ_3 напряжений существует прямая пропорциональность при $\sigma_1 > \sigma_{str}$;

– для одного и того же грунта отношение приращений напряжений является константой (зависит от φ), т.е. $m = \Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1 = \operatorname{const} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$;

– для большинства глинистых грунтов значение φ попадает в интервал $15^\circ - 25^\circ$; при этом пределы изменения величины m от 0.4 до 0.6 (следовательно, ориентировочно может быть принято среднее значение $m = 0.5$);

– для песчаных грунтов структурная прочность $\sigma_{str} = 0$;

– для грунтов с жесткими связями (полускальных, скальных) структурная прочность (длина отрезка на оси абсцисс) многократно увеличивается по сравнению с глинистыми грунтами.

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА ДЛЯ ГРУНТА В ТОЧКЕ МАССИВА. ИСХОДНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ (НДС)

На i -м горизонте массива в исходном состоянии (с горизонтальной дневной поверхностью массива) под действием активного вертикального наибольшего главного сжимающего напряжения в каждой точке $\sigma_{1,i}$, в соответствии с законами механики грунтов, возникают два взаимно перпендикулярных равных напряжения распора (до возникновения силового возмущения в массиве) на глубине Z_i :

– вертикальное напряжение:

$$\sigma_{1,i} = \gamma Z_i; \quad (6)$$

– горизонтальные напряжения распора:

$$\sigma_{2,i} = \sigma_{3,i} = m (\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}); \quad (7)$$

где $m = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$.

Соответственно закон Кулона–Мора получает вид:

$$\frac{\sigma_{3,i}}{\gamma Z_i - \sigma_{str,i}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right). \quad (8)$$

Здесь используется значение структурной прочности для грунта в i -й точке массива, а для удельного веса γ берется среднее значение для вышележащих масс над i -й точкой.

По условиям компрессии горизонтальные деформации отсутствуют, т.е. сжатие грунта происходит в условиях невозможности боковых деформаций, но нахождение элементарного объема

(i -й точки) грунта в массиве накладывает свои особенности. Во всех точках горизонта на глубине Z_i состояние грунта определяется уравнением Кулона–Мора (8), т.е. **между распором в точке и отпором окружающего грунта имеет место равновесие.**

В i -й точке в зависимости от соотношения $\sigma_{1,i}$ и $\sigma_{str,i}$ грунт может находиться в одной из трех фаз по Е.И. Медкову.

Пластическое деформирование грунта, когда $\sigma_{1,i}$ превышает $\sigma_{str,i}$ (фаза III), препятствует применению теории упругости для расчетов НДС в этих зонах (горизонтах) массива. Критерий прочности грунта Кулона–Мора (уравнения (1)–(4)) как раз определяет наличие таких горизонтов на глубинах Z_i при $\gamma Z_i > \sigma_{str}$ (где γ – среднее значение удельного веса толщи над i -й точкой).

Чем больше $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$, тем более увереннее следует ожидать большую раздробленность грунта (при $\varphi_i = \operatorname{const}$), т.е. дробление на клинья, агрегаты, плотно прилегающие друг к другу, с сомкнутыми трещинами.

Поскольку жесткие боковые вертикальные стенки (как в одомере), ограничивающие элементарный объем грунта, отсутствуют, возможна незначительная податливость грунта (проявление боковых и вертикальных деформаций) при изменении φ , от точки к точке. Вследствие этого процесса в грунте одного генезиса на различных глубинах толщи может формироваться соответствующая значению γZ_i прочность грунта на глубине Z_i , в основном за счет изменения величины сцепления.

В возможном слабом прослое на глубине Z_i , при $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i = \operatorname{const}$ может возникать большее значение бокового давления (горизонтальное главное напряжение) по сравнению с окружающим грунтом, вследствие меньших прочностных характеристик ($\sigma_{str,i}$ и φ_i) грунта прослоя, см. (8).

$$\sigma_{3a,i} = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right). \quad (9)$$

При этом состояние массива остается стабильным, действует критерий Кулона–Мора (уравнения (1)–(4)). Силовое возмущение при локальном снижении $\sigma_{str,i}$ и φ_i в замкнутом прослое не возникает, поскольку прослой заземлен в более прочных грунтах, в которых мобилизуется соответствующее значение отпора, определяющее равновесие в этой локальной зоне.

Таким образом, **основные закономерности, вытекающие из закона Кулона–Мора, в исходном состоянии грунтового массива** заключаются в следующем:

– закон определяет сжатие грунта в массиве под действием вертикального наибольшего напряжения (геостатического давления) $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$ в условиях компрессии;

– в верхней части массива, где вертикальное давление γZ_i от веса грунтов не превышает значе-

ние структурной прочности, в i -й точке отсутствуют горизонтальные напряжения распора (напора). Грунт находится в фазах I–II (по Е.И. Медкову), практически при полном отсутствии деформаций в соответствующих точках;

– при превышении вертикальным давлением предела структурной прочности $\sigma_{str,i}$ грунта на горизонте Z_i устанавливается равновесное напряженно-деформированное состояние, в соответствии с характеристиками механических свойств грунта (c_i ; Φ_i ; γ);

– для каждого горизонта массива могут быть свои особенности равновесного состояния грунта в зависимости от значений $\sigma_{str,i}$, Φ_i и действующих на глубине Z_i напряжений;

– в массиве на горизонтальной плоскости на глубине Z_i горизонтальные напряжения распора p_i (давление грунта в точке) появляются, когда вертикальное давление $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$ (наибольшее главное напряжение) превышает структурную прочность грунта, $\gamma Z_i > \sigma_{str}$, т.е.:

$$p_i = \sigma_{2,i} = \sigma_{3,i} = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi_i}{2} \right); \quad (10)$$

– давление распора p_i в точке геологической среды имеет то же понятие (по закону Кулона–Мора), как и атмосферное давление в воздушной среде (по закону Паскаля, с учетом высоты земной поверхности) или давление воды в i -й точке водоема. Соответственно с (10), закон Кулона–Мора для оценки НДС в точке приобретает вид:

$$\frac{p_i}{\gamma Z_i - \sigma_{str,i}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi_i}{2} \right); \quad (11)$$

– в массиве с ростом глубины Z_i , т.е. при нарастающем значении вертикального (геостатического) давления, для одного и того же грунта имеет место увеличение структурной прочности грунта за счет повышения величины сцепления в уплотненном под большим давлением грунте (Φ изменяется значительно меньше или почти не изменяется);

– в соответствии с вышеизложенным грунт одного и того же генезиса, залегающий на разных глубинах массива, может иметь разные значения сцепления c_i и структурной прочности $\sigma_{str,i}$.

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА ДЛЯ ГРУНТА В ТОЧКЕ МАССИВА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО (ДОПРЕДЕЛЬНОГО) ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТА

Рассматривается НДС, которое возникает в **коренном грунтовом массиве** с появлением силового возмущения, например, в виде разгрузки напряжений в локальной зоне у границы с оползневой очагом. В очаге имеет место развитие блокового оползня типа сжатия–выдавливания с

характерным ступенчатым рельефом. Выделяется дугообразная бровка оползневого склона, стенка срыва (откос коренного массива). Обозначается центральный створ оползневого участка.

Как изменяется НДС в коренном массиве в i -й точке рассматриваемого горизонта, удаленной от центра зоны силового возмущения на расстоянии r_i ?

К настоящему времени установлено, что формирование оползневого блока в коренном массиве происходит как образование диссипативной геологической структуры [7]. При этом применительно к оползневому очагу определяются базис диссипации, основные параметры ДГС и условия предельного состояния нового блока перед его отделением от коренного массива. По-видимому, образование оползневого блока определяет начало нового этапа диссипации, хотя и при унаследованном базисе диссипации (горизонтальной поверхности скольжения оползневых блоков), но пока при отсутствии ДГС с проявлением соответствующих границ.

Хотя в коренном массиве и восстанавливается (после отделения блока) исходное НДС вблизи оползневого очага, но проявляется его влияние на изменение значений давления распора в точках коренного массива, расположенных выше базиса диссипации (базиса ранее отделившегося блока). В каждой точке на горизонте Z_i появляется вектор напряженности (по силовой линии), ориентированный к центру возмущения (центру оползневого очага). Соответственно условия компрессионного сжатия в точке, удаленной от вертикальной оси, проходящей через центр силового возмущения, на расстояние r_i , представляются в виде напряжений, действующих на элементарный единичный отрезок дуги $dS = 1$, радиусом r_i (с выпуклой стороны – напряжения распора).

В соответствии с законом Кулона–Мора происходит ориентация главных горизонтальных напряжений (составляющих давления распора) по возникшим линиям напряженности. Появляются наименьшее и среднее горизонтальные напряжения (рис. 2).

Вследствие локальности силового возмущения эквипотенциальные линии напряженности на рассматриваемом горизонте представляют собой дуги окружности радиусом r_i . Среднее горизонтальное напряжение ориентируется по касательной к эквипотенциальной линии (см. рис. 2) радиусом r_i в краевых точках дуги $dS = 1$, в точке M (рис. 3):

$$\sigma_{2ri} = m(\sigma_1 - \sigma_{str,i}) \quad (12)$$

Наименьшее горизонтальное напряжение в i -й точке ориентируется по силовой линии, направленной по радиусу к центру зоны разгрузки, и определяется по выражению:

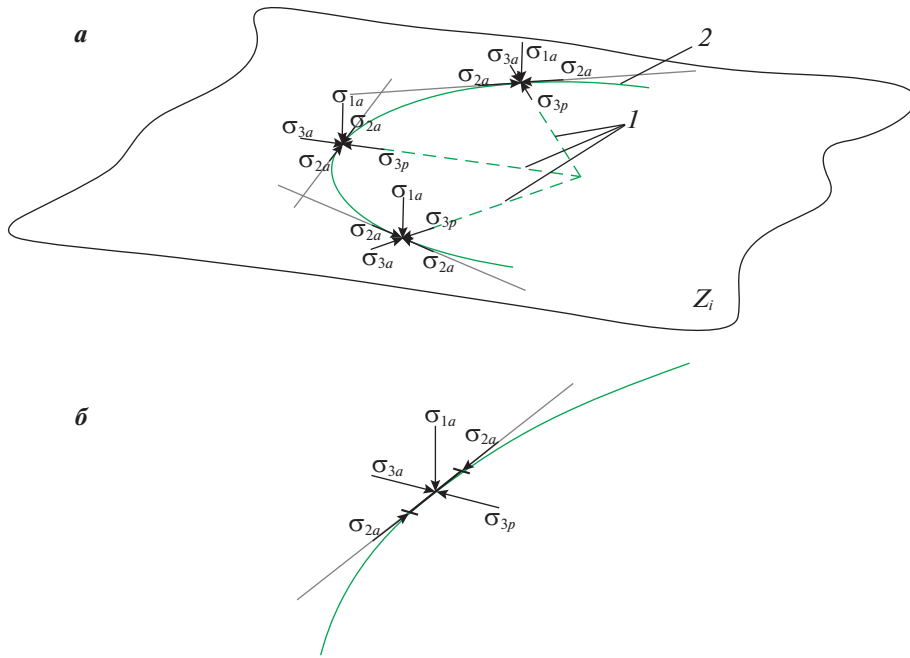


Рис. 2. Ориентация горизонтальных главных напряжений σ_2 и σ_3 по силовым и эквипотенциальным линиям на горизонте Z_i : **а** – на горизонте Z_i ; **б** – в точке (единичном отрезке кривой эквипотенциальной линии: a – зона распора (напора) по направлению к локальному силовому возмущению (разгрузке напряжений); p – зона отпора со стороны локальной разгрузки напряжений; 1 – силовые линии; 2 – эквипотенциальная линия. σ_{1a} – вертикальное наибольшее, σ_{2a} и σ_{3a} – горизонтальные соответственно среднее и наименьшее главные напряжения распора, σ_{3p} – напряжение отпора.

$$\sigma_{3ri} = m(\sigma_1 - \sigma_{str,i})(1 - 1/r_i)$$

или

$$p_i = \sigma_{3ri} = m(\gamma Z_i - \sigma_{str,i})(1 - 1/r_i), \quad (13)$$

где γZ_i – вертикальное давление в i -й точке от веса столба грунта со средним значением удельного веса γ .

Появление наименьшего и среднего главных напряжений (наибольшим главным напряжением является вертикальное $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$) связано с действием понижающего множителя $(1 - 1/r_i)$, который определяет влияние средних горизонтальных главных напряжений, действующих по концам единичного отрезка эквипотенциальной линии

радиусом r_i , в i -й точке горизонта на глубине Z_i . Единичный отрезок дуги $dS = 1$ в точке M находится на силовой линии (см. рис. 3), по которой действует напряжение σ_{3aM} . В условиях сжатия горизонтальные напряжения распора σ_{2a} , действующие по концам дуги dS , уменьшают значения напряжений по силовой линии (радиусу r_i).

Здесь также состояние грунта описывается уравнением Кулона–Мора (2), в котором знаменатель представлен произведением $(\sigma_1 - \sigma_{str})(1 - 1/r_i)$, при тех же значениях $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$ и m (r_i по рис. 3), β – центральный угол, опирающийся на элементарный отрезок дуги в i -й точке M .

Выпуклая сторона дуги обращена в глубь массива, и в точке M формируются силы, вызванные напряжениями распора, в точке N – напряжениями отпора (со стороны зоны разгрузки напряжений).

Но в связи с уменьшением значений главных напряжений σ_{3i} (с приближением точки к бровке откоса) на каждом горизонте массива начинают боковые (горизонтальные) деформации грунта в слое на глубине Z_i в сторону центра силового возмущения. Соответственно возникают и вертикальные деформации (осадка) грунта до стабилизации состояния по достижении равенства в рассматриваемой точке:

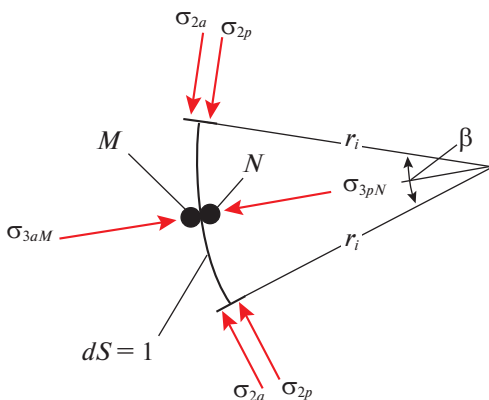


Рис. 3. Схема напряжений, действующих в точках M и N на дуге $dS = 1$ радиусом r_i (пояснения в тексте).

$$\frac{\sigma_{3i}}{\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi_i}{2} \right) \left(1 - \frac{1}{r_i} \right). \quad (14)$$

При этом устойчивость в точке M (см. рис. 3) сохраняется, несмотря на возникновение указанных деформаций, в соответствии с равенством напряжений распора в точке M и отпора в соседней точке N (как реакции на активное давление σ_{3aM} в точке M):

$$\sigma_{3aM} = \sigma_{3pN}. \quad (15)$$

Таким образом, в развитие теоретических решений (1) и (2) Кулона–Мора получено новое уравнение (14), характеризующее напряженно-деформированное состояние грунта в массиве на этапе допредельного развития деформаций в зависимости от степени удаления рассматриваемой точки от центра силового возмущения. На участке развития оползневой очага изменение НДС в коренном массиве (выше очага) происходит в грунтах выше горизонта существующей поверхности скольжения (базиса оползания). То есть изменение НДС осуществляется в части массива, которая находится в зоне влияния разгрузки напряжений вследствие близости к оползневому очагу. При этом верхней границей оползневой очага является стенка срыва (на откосе коренного массива). В оползневом очаге, в верхней части оползневого склона оседает блок (отделившаяся диссипативная геологическая структура [7]), под давлением которого, в соответствии с детрузивным механизмом, происходит смещение оползневой массы. В коренном массиве имеет место временное завершение процесса образования ДГС, в связи с отделением (“отторжением”) ДГС в виде нового оползневой блока.

В коренном массиве ДГС отсутствуют, и НДС представлено значениями давления распора в точках в условиях компрессионного сжатия в соответствии с законом Кулона–Мора. То есть влияние разгрузки напряжений и изменение НДС в массиве происходит в виде снижения значений давления распора от точки к точке на рассматриваемом горизонте и роста осадки в точках по мере их приближения к оползневому очагу.

Таким образом, в соответствии с представленными результатами теоретических исследований, основные закономерности изменения НДС в коренном массиве на начальном этапе проявления локального силового возмущения (разгрузки напряжений на участке склона) заключаются в следующем:

- диссипация воздействия от локального силового возмущения, в частности формирования склона и развития склоновых процессов, проявляется на НДС коренного массива посредством возникновения силовых линий, ориентации по ним напряжений распора **на каждом горизонте массива и снижении их значений с приближением к оползневому очагу (участку склона);**

- в каждой точке сохраняется равновесие (14) между активными горизонтальными напряжени-

ями – давлением распора (напора), и противодействием окружающего грунта – отпором. При этом новое уменьшенное значение распора (вследствие влияния среднего главного напряжения σ_{2ri}), связанное с ориентацией давления в точке по линиям напряженности, мобилизует по силовой линии в соседней точке равное ему значение отпора;

- отпор регламентирует изменение давления в точке массива; наибольшее его снижение происходит в зоне склона, тем более, если на склоне имеет место развитие блокового оползня.

ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НДС КОРЕННОГО МАССИВА НА УЧАСТКЕ ПРОЯВЛЕНИЯ БЛОКОВЫХ ОПОЛЗНЕЙ

Анализ данных лабораторных испытаний. В соответствии с законом Кулона–Мора, в точке массива при вертикальном давлении на грунт, превышающем значение структурной прочности, имеет место прямая пропорциональность между напряжениями в точке.

$$\gamma Z_i = p_i / \text{tg}^2(45 - \varphi_i/2) + \sigma_{str, i}. \quad (16)$$

Если снижается давление распора p_i , то возникают деформации грунта в точке (как горизонтальные, так и вертикальные), в результате которых и формируется новое равновесие по (14). Испытания в стабилометре показывают, что при осевом напряжении $\sigma_1 > \sigma_{str}$ возникает состояние прямой пропорциональности между приращениями $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_3$ [6], и снижение σ_3 (при $\sigma_1 = \text{const}$) вызывает осадку образца, а когда уменьшение σ_3 достигает 10–20%, происходит прогрессирующее деформирование и разрушение образца грунта [4, 9] (см. рис. 1).

В 1962 г. И.З. Лобанов провел серию испытаний среднезернистого сухого песка плотного сложения (плотность 1.8 г/см³) в специальном стабилометре, в котором нагружение образца можно было осуществлять при постоянном соотношении между главными напряжениями: вертикальным σ_1 и горизонтальным (радиальным) σ_3 [2]. Проведены испытания при соотношениях $\alpha = \sigma_1/\sigma_3$: 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3 и 4. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что осадка грунта в стабилометре существенно возрастает с увеличением α , т.е. со снижением бокового давления (рис. 4). В частности, при постоянном значении σ_1 снижение бокового давления σ_3 в 4 раза (от $\alpha = 1$ до $\alpha = 4$) приводит к уменьшению модуля деформации (в интервале $\sigma_1 = 0.05 \dots 0.6$ МПа) в 18–20 раз.

Таким образом, испытания грунтов в приборах трехосного сжатия показали, что, как это следует из закона Кулона–Мора, снижение бокового давления приводит к деформированию грунта

(в образце или в точке массива) и созданию НДС в соответствии с (14)–(16), учитывая текущее сниженное значение p_i .

Анализ результатов стендовых испытаний. В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в 1990-х гг. были проведены исследования влияния бокового давления грунта на осадку песчаного основания штампа [1]. Опыты проводились на специальном стенде, позволяющем создавать разное начальное напряженное состояние путем изменения бокового давления при одинаковой вертикальной нагрузке $q = 0.05$ МПа. На рис. 5 представлены графики изменения осадки штампа в зависимости от коэффициента бокового давления (в песке $\sigma_{str} = 0$) при допредельной нагрузке на штамп в пределах 0.2–1.0 МПа. Из графиков видно, что со снижением бокового давления и соответственно уменьшением коэффициента бокового давления (при $q = const$) растет деформативность грунта (увеличивается осадка штампа при постоянном давлении на него, $p = const$). Это также означает, что **диссипация, связанная с локальным снижением напряжения в массиве (в данном случае уменьшения бокового давления на грунт в стенде), будет вызывать изменение НДС в прилегающих зонах (точках) массива (в грунтах в объеме стенда), которое проявляется (при сохранении исходных характеристик прочности) в повышении деформативности грунта (повышается осадка штампа).**

Действие штампа моделирует осадку сооружения, которое оказывает давление p на грунт, в условиях, когда в точках грунтового основания сооружения происходит снижение давления распора, например, вследствие влияния склона (склоновых процессов).

Результаты экспериментальных исследований изменения НДС грунтов в условиях компрессионного сжатия (в лабораторных и стендовых испытаниях) показывают, что состояние грунта в точке определяется в соответствии с законом Кулона–Мора в главных напряжениях по (1) и (2). Снижение бокового давления (давления в точке) вызывает осадку образца в приборе, или осадку штампа в стенде, определяя повышение деформативности грунта по сравнению с исходным состоянием. Указанные закономерности изменения НДС грунта проявляются при нагрузках и воздействиях на грунт, меньших предельных значений (в допредельном состоянии).

Анализ результатов натуральных наблюдений. В г. Рыбинск (Ярославская обл.) на стенах многоэтажных домов, расположенных по ул. Набережная Космонавтов и отстоящих от берега р. Волга на расстоянии 30–60 м, стали появляться трещины. В 1999–2004 гг. на одном из участков берега были проведены геодезические наблюдения за деформациями прибрежной части городской застройки с целью оценки возможного влияния на

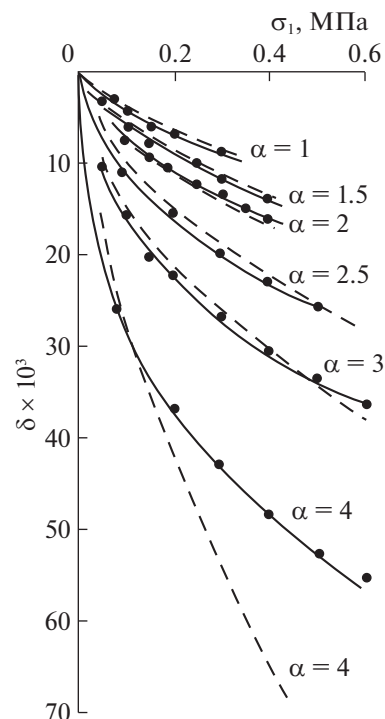


Рис. 4. Зависимость относительных деформаций δ песчаного грунта от осевых напряжений σ_1 при стабиллометрических испытаниях. Сплошные линии — замеренные значения, пунктир — расчетные по методике И.З. Лобанова [2].

указанные явления склоновых процессов [8, 10]. На рис. 6 представлены эпюры осадок краевой части плато и зданий по двум наблюдательным створам за июнь 1999 г. (4 цикла наблюдений в течение наиболее активного периода года).

Из графиков видно, что осадки реперов и марок на зданиях связаны с влиянием берегового склона. Осадки увеличиваются по мере приближения реперов к откосу массива (наибольшие значения осадки реперов, расположенных на оползневом склоне и на плато у бровки склона). Интенсивность осадок несколько выше по профилю, проходящему через оползневой участок (вблизи дома № 45).

В целом анализ результатов натуральных наблюдений свидетельствует, что влияние склона сказывается на снижении значений давления p_i в точках коренного массива на участке экспериментальных исследований, где $\gamma Z_i > \sigma_{str,i}$ (в соответствии с (10) и (13)), и на изменении НДС в массиве, вызывая осадку реперов по наблюдательным створам и неравномерную осадку грунтов в точках массива (по данным грунтовых реперов) и существующих зданий (по маркам на стенах), попадающих в зону влияния склона.

Участок склона (откоса) характеризуется уменьшением вертикального давления γZ_i в точках массива склона по сравнению с НДС на том же самом горизонте в массиве плато. Это влияние

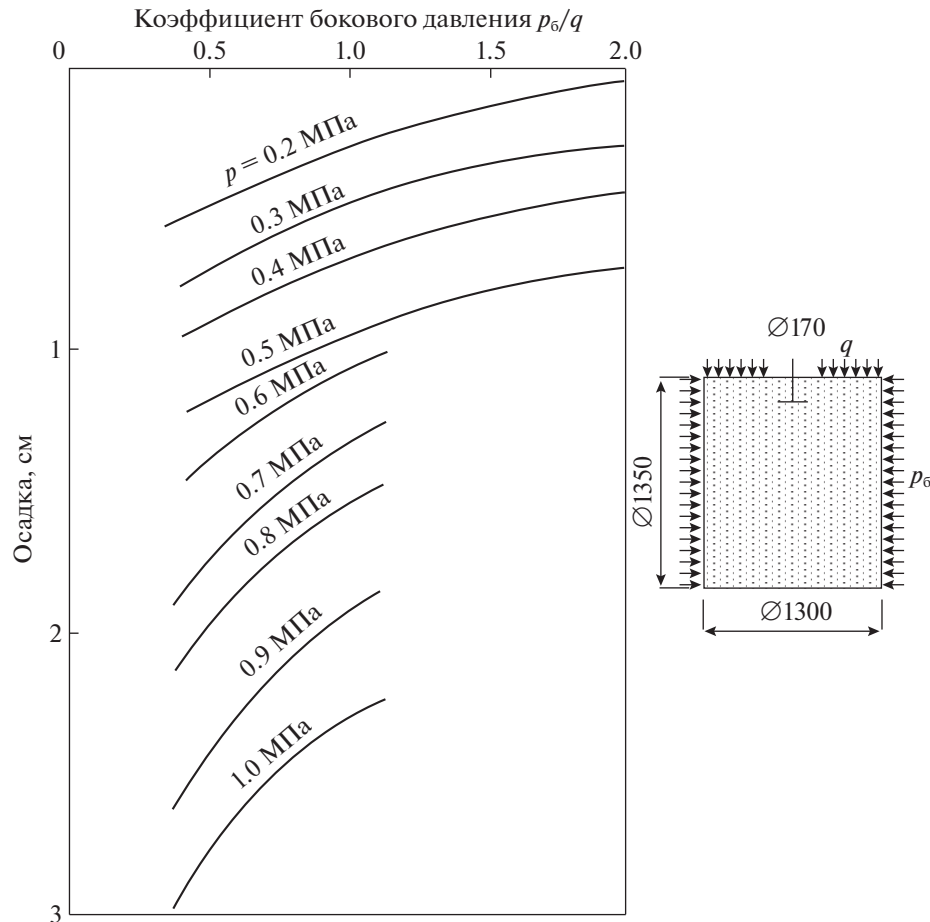


Рис. 5. Графики зависимости осадки песчаного основания штампа от изменения начального напряженного состояния (снижения бокового давления p_6) при постоянном вертикальном давлении (q) на основании и допредельной нагрузке (p) на штамп: $q = 0.05$ МПа; $p_6 = 0.0019; 0.05$ и 0.1 МПа; $p = 0.2 \dots 1.0$ МПа. Справа схематически показан в разрезе стенд, параметры стенда и штампа, давления на грунт в стенде (по материалам [1]).

склона передается от точки к точке по взаимодействию давлений распора и отпора в массиве краевой части плато. Величины осадки дневной поверхности массива плато рассматриваемого участка зависят от характеристик прочности грунта в точках ($\sigma_{str, i}$ и φ_i), глубин залегания и их удаления от бровки склона. При этом коренной грунтовый массив, воспринимающий воздействие склона, находится в устойчивом состоянии в условиях компрессионного сжатия в поле тяготения Земли с формированием НДС в точках массива по закону Кулона–Мора в главных напряжениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что уже на этапе допредельного состояния коренного массива влияние склона осуществляется как первый этап диссипации в виде изменения НДС в точках массива и возникновения в них пластических деформаций грунтов. В условиях городской застройки указанные про-

цессы могут приводить к деформациям зданий и сооружений, попадающих в зону влияния склона.

Дальнейшее развитие склоновых процессов, в частности формирование нижней границы диссипации вследствие воздействия геологического процесса (образование глубокого базиса оползания, техногенной подрезки и т.п.) может привести к возникновению диссипативных геологических структур (второй этап диссипации), подготовке предельного состояния массива и разрушительным деформациям в виде отделения оползневого блока [7].

Методы мониторинга процессов изменения НДС грунтового массива вследствие влияния близости склона и проявления диссипации, защитные мероприятия должны базироваться на выявленных закономерностях. В частности, необходимо учитывать, что влияние склонов и склоновых процессов проявляется в первую очередь как разгрузка напряжений в точках массива. Следствием этого являются деформации грунтов, распространяющиеся на десятки метров от бровки склона с захватом существующих зданий и со-

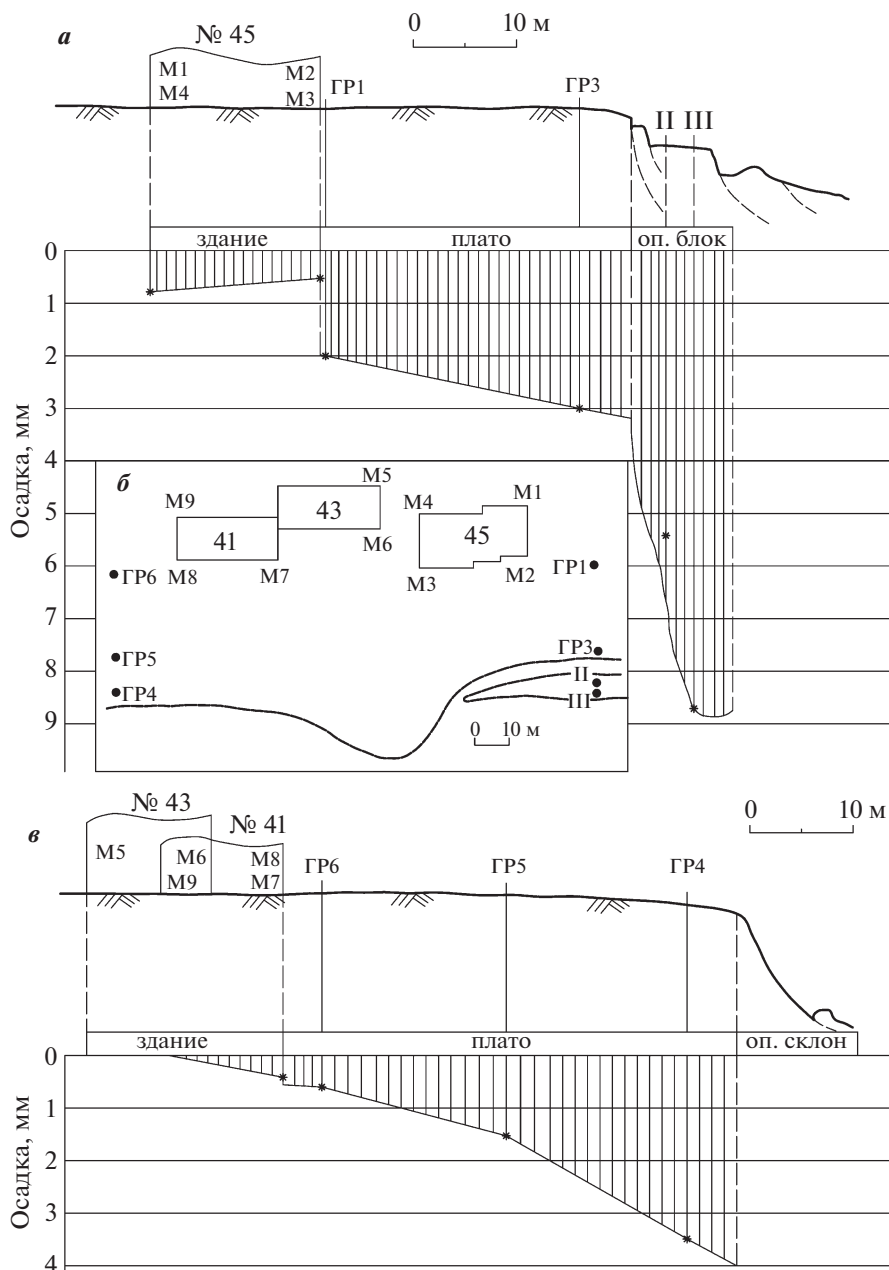


Рис. 6. Осадки по маркам на зданиях и грунтовыми реперами за июнь 1999 г. (4 цикла наблюдений, 31.05...23.06); г. Рыбинск, берег р. Волга (по материалам ГП Рыбинский комплексный отдел инженерно-строительных изысканий): *а* – профиль и эпюра деформаций у дома № 45; *б* – план-схема размещения марок (M1...M8) и грунтовых реперов (GР1...GР6; II, III); *в* – профиль и эпюра деформаций у дома № 41.

оружий. Защитные мероприятия должны обеспечивать стабилизацию напряжений в точках грунтового основания зданий и в массиве краевой части плато, примыкающей к динамичному склону (откосу).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронин В.Н., Валид И.О. О влиянии бокового давления грунта на предельную нагрузку и осадку песчаного основания штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. № 3. С. 8–10.
2. Лобанов И.З. Влияние напряженно-деформированного состояния на деформационные характеристики песчаного грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1982. № 1. С. 23–25.
3. Ляшенко П.А. О деформации глинистого грунта в основании фундамента // Тр. юбилейной конф., посв. 50-летию РОМГиФ. М.: РОМГиФ, 2007. Т. 2. С. 114–118.
4. Медков Е.И. Фазы сопротивления грунта // Механика грунтов, основания и фундаменты. Тр. МИИТа. М.: ТрансЖелдориздат, 1959. Вып. 100. С. 26–61.

5. *Постоев Г.П.* Закономерности гравитационного деформирования грунтовых массивов // *Геоэкология*. 2009. № 6. С. 534–543.
6. *Постоев Г.П., Казеев А.И., Кутергин В.Н.* Определение консолидированных характеристик прочности грунта по испытанию на компрессионное сжатие // *Геоэкология*. 2018. № 3. С. 36–42.
7. *Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М.* Физические законы распределения давления в геологической среде // *Геоэкология*. 2020. № 6. С. 22–31.
8. *Постоев Г.П., Шеко А.И., Дьяконова В.И., Парфенов С.И.* О причинах деформаций зданий, расположенных в береговой полосе рек Волги и Шексны в г. Рыбинске // *Геологическое изучение и использование недр*. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 2001. Вып. 6. С. 22–32.
9. *Сипидин В.П., Сидоров Н.Н.* Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Л.: Госстройиздат, 1963. 92 с.
10. *Postoev G.P.* The typical zones of soil deformations on slide-prone slopes // *Proc. of the First Europ. conf. on Landslides*, Prague, Czech Republic. Balkema, The Netherlands. 2002. P. 281–286.

COULOMB-MORE'S LAW AND THE CHANGE IN THE STRESS-STRAIN STATE OF A LANDSLIDE-PRONE MASSIF

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

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

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

Stresses in points of the massif are determined and distributed according to the Coulomb-More law in the main stresses, under the conditions of compression. Influence of slope and development of slope processes causes in massif, according to dissipation processes, decrease of stresses in points. The results of experimental studies (laboratory, bench and in-situ) indicate that the regular processes of stress reduction in the points of the massif cause deformation of soils already at a pre-limit stage (for the massif). But they can cause the formation of cracks in the bearing structures of buildings and the appearance of dangerous unequal subsidence of their foundations.

Keywords: *Coulomb-More law, stress-strain state, dissipation, lateral expansion, stress reduction, laboratory, bench and field tests, slope processes, massif subsidence*

REFERENCES

1. Bronin, V.N., Valid, I.O. *O vliyaniy bokovogo davleniya grunta na predel'nyuyu nagruzku i osadku peschanogo osnovaniya shtampa* [The impact of lateral pressure on the limit load and settlement of sandy foundation of stamp]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1992, no. 3, pp. 8–10 (in Russian).
2. Lobanov, I.Z. *Vliyaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na deformatsionnye kharakteristiki peschanogo grunta* [The influence of stress-strain state on deformation parameters of sandy soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1982, no. 1, pp. 23–25. (in Russian)
3. Lyashenko, P.A. *O deformatsii glinistogo grunta v osnovanii fundamenta* [About deformation of clayey soil in the basement foundation]. *Proc. The jubilee conference dedicated to the 50th anniversary of the Russian society of soil mechanics, geotechnics and foundation engineering*. Moscow, ROMGGiF Publ., 2007, vol. 2, pp. 114–118. (in Russian)
4. Medkov, E.I. *Fazy soprotivleniya grunta* [Phases of soil resistance]. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics and foundation engineering]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1959, issue 100, pp. 26–61. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Zakonomernosti gravitatsionnogo deformirovaniya gruntovykh massivov* [Regularities in gravitational deformation of ground massifs]. *Geoekologiya*, 2009. no. 6, pp. 534–543. (in Russian)
6. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kutergin, V.N. *Opredele-nie konsolidirovannykh kharakteristik prochnosti grunta po ispytaniyu na kompressionnoe szhatie* [Soil strength parameters determined by compression test]. *Geoekologiya*, 2018, no. 3, pp. 36–42. (in Russian)
7. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of stress distribution in geoenvironment]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
8. Postoev, G.P., Sheko, A.I., D'yakonova, V.I., Parfenov, S.I. *O prichinakh deformatsii zdaniy, raspolozhennykh v beregovoi polose rek Volgi i Sheksny v g. Rybinske* [About the causes of deformation of buildings on the banks of Volga and Sheksna rivers in the town of Rybinsk]. *Geologicheskoe izuchenie i ispol'zovanie neдр* [Geological study and the use of bowels]. Moscow, ЗАО “Геоинформмарк” Publ., 2001, issue 6, pp. 22–32. (in Russian)
9. Sipidin, V.P., Sidorov, N.N. *Issledovanie gruntov v usloviyakh trekhosnogo szhatiya* [Investigation of soils and rocks by triaxial compression test]. Leningrad, Gosstroizdat Publ., 1963, 92 p. (in Russian)
10. Postoev, G.P. The typical zones of soil deformations on slide-prone slopes. *Proc. of the first Europ. conf. on landslides*, Prague, Czech Republic, June 24–26, 2002. P. 281–286. Balkema, the Netherlands, 2002.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 550.348.098.64

СЕЙСМИЧНОСТЬ РОССИИ В 2021 ГОДУ

© 2022 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 Россия² Институт физики Земли РАН, ул. Б. Грузинская, д. 10, Москва, 123995 Россия

*E-mail: amal@gsras.ru

**E-mail: kolmar@gsras.ru

***E-mail: a.ruzaykin@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2022 г.

После доработки 10.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

В работе представлены результаты мониторинга сейсмичности 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 2021 г. Для каждого региона приведены каталоги наиболее значимых землетрясений с параметрами гипоцентров и магнитуд, полученных по данным обработки инструментальных наблюдений. Проанализировано проявление макросейсмического эффекта от большинства ощутимых землетрясений ($I \geq 2$ баллов по шкале ШСИ-2017), произошедших на территории России.

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

DOI: 10.31857/S086978092204004X

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 г. ФИЦ ЕГС РАН были продолжены работы по сейсмическому мониторингу территории России [2, 6, 8]. В получении сейсмических данных и их обработке участвовали 361 сейсмостанция 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, принадлежащие и другим организациям 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 2021 г. структура наблюдательной сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН в основном сохранилась. Были введены в эксплуатацию 8 новых станций – “Удина”, “Юлия Кугаенко” в Камчатском крае, “Краснополье” и “Мыс Хокуй” на Сахалине, “Туран” в Республике Бурятия, “Умба” в Мурманской обл. и “Попов Хутор” в Республике Северная Осетия – Алания.

На рис. 1 приведена карта расположения на территории России 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].

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ПОЛУЧАЕМЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

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

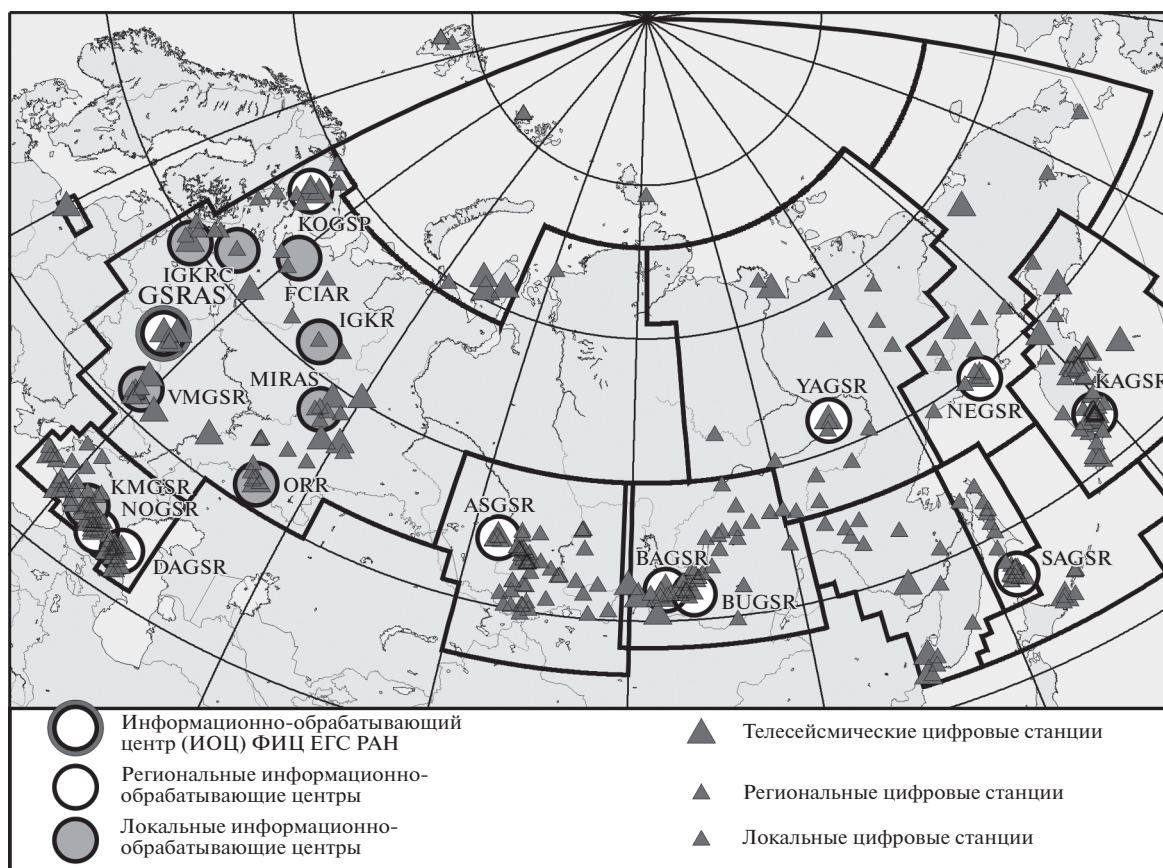


Рис. 1. Карта расположения на территории России сейсмических станций, данные которых были использованы при определении параметров землетрясений.

Срочный режим обработки осуществляют Службы срочных донесений (ССД), функционирующие в г. Обнинске, а также в 5 филиалах – Камчатском (г. Петропавловск-Камчатский), Сахалинском (г. Южно-Сахалинск), Байкальском (г. Иркутск), Алтае-Саянском (г. Новосибирск) и Северо-Осетинском (г. Владикавказ). ССД в г. Обнинск 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 мин 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 г. Обнинск подробно описаны в работах [7, 9].

Текущий режим обработки, при котором используются данные более 950 сейсмических станций, как российских, так и мировой сети, обеспечивает выпуск сейсмологических каталогов и бюллетеней ФИЦ ЕГС РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В целом на территории России в 2021 г., по данным ССД ФИЦ ЕГС РАН, при проведении сейсмического мониторинга зафиксировано 700 землетрясений (в 2020 г. – 651, в 2019 г. – 681 землетрясение) с $m_b \geq 3.1$, в том числе землетрясений, ощутимых на территории России, – 140, в 2020 г. –

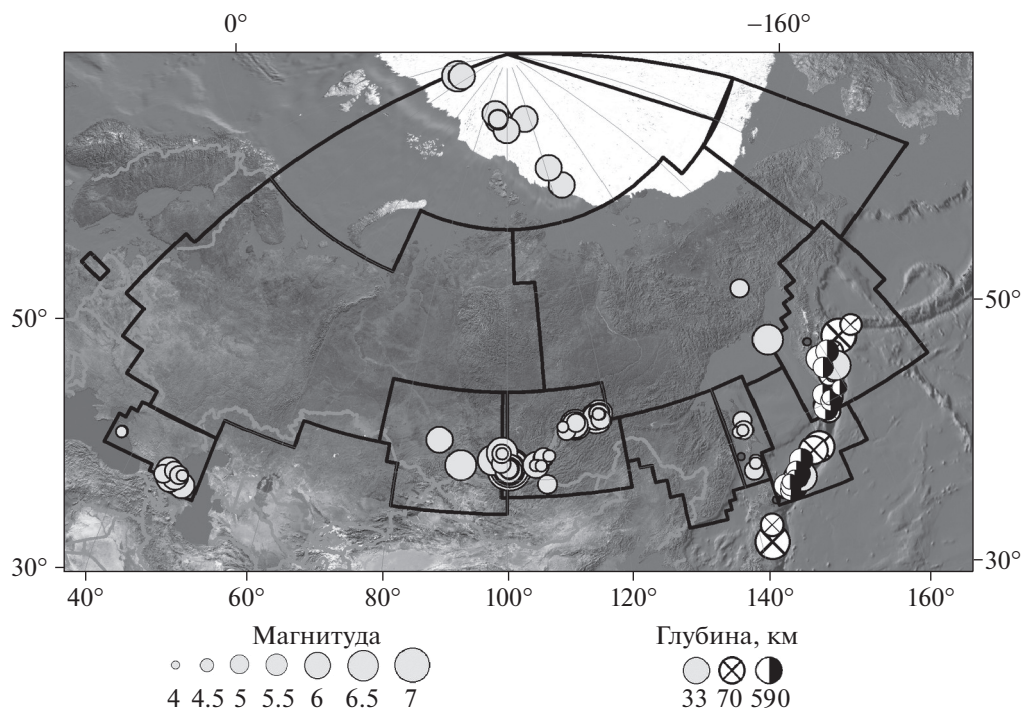


Рис. 2. Карта расположения эпицентров землетрясений, осязанных на территории Российской Федерации в 2021 году.

101, в 2019 г. — 83. В табл. 1 приведены данные о проявлении макросейсмического эффекта от основных осязанных землетрясений на территории России в 2021 г. [1]. На рис. 2 приведено расположение эпицентров землетрясений, осязанных на территории Российской Федерации в 2021 г.

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

В 2021 г. в районе Крыма зафиксировано 3 землетрясения с $m_b \geq 3.2$, осязанных не было.

На территории региона Западного Кавказа и в прилегающей акватории Черного моря в прошлом году было зафиксировано 20 землетрясений с $m_b \geq 3.2$, из них 3 осязанных с $m_b \geq 3.6$ (см. таблицу). Самое сильное землетрясение за 2021 г. с $m_b = 4.5$ произошло 24 мая на территории Грузии в 20 км от границы с Российской Федерацией и вызвало сотрясения интенсивностью до 3–4 баллов (здесь и далее по шкале ШСИ-2017¹) в близлежащих населенных пунктах.

В 2021 г. на территории региона Восточного Кавказа зафиксировано 90 землетрясений с $m_b \geq 3.1$, из них 7 осязанных с $m_b \geq 3.6$ (см. таблицу). Самое сильное землетрясение региона произошло 20 ок-

тября на территории Чеченской Республики с $m_b = 4.9$ и вызвало интенсивность сотрясений в близлежащих населенных пунктах силой до 5 баллов.

На обширной, но слабосейсмичной территории Восточно-Европейской платформы, Урала и Западной Сибири в 2021 г. не было зарегистрировано ни одного землетрясения с $m_b \geq 3.5$.

В Арктическом регионе на территории зоны ответственности Российской Федерации было зарегистрировано 11 землетрясений с $m_b \geq 4.3$, из них 7 землетрясений с эпицентрами, расположенными в районе севернее архипелага Северная Земля, 2 землетрясения с эпицентрами, расположенными восточнее архипелага Северная Земля, 2 с эпицентрами, расположенными севернее Шпицбергена (см. таблицу). Поскольку эпицентры этих землетрясений располагались далеко от населенных пунктов, сведений об их осязанности не поступало.

В районе архипелага Шпицберген вне зоны ответственности Российской Федерации было зарегистрировано одно землетрясение с $m_b = 4.9$.

В южной части Сибири в пределах Горного Алтая и Саян и пограничной области России и Монголии в 2021 г. было зарегистрировано 23 землетрясения с $m_b \geq 3.4$, из них 6 осязанных с $m_b \geq 3.6$ (см. таблицу). Три сильных землетрясения с $m_b = 5.2$ произошли 21 февраля в Республике Тыва с интенсивностью сотрясения до 2 бал-

¹ ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. Введ. 2017-07-19. М.:Стандартинформ, 2017. 28 с.

Таблица 1. Список ощутимых землетрясений на территории России в 2021 г.

Дата Время (чч:мин:сс)	Широта/Долгота, N/E, град	Глубина, км	m_b (MS)	Ощутимость, баллы
Западный Кавказ				
13.03.2021 22:15:24	44.55/37.45	10	3.6	3–4
24.05.2021 21:43:40	42.49/44.95	– “ –	4.5	4–5
17.09.2021 16:50:31	44.6 3/37.57	– “ –	3.7	2–3
Восточный Кавказ				
02.01.2021 01:05:53	42.09/47.98	10	4.8	4.5–5
28.06.2021 16:53:39	43.25/46.20	5	4.3	5
28.07.2021 00:41:27	42.68/46.61	30	4.7	4
03.09.2021 03:34:49	42.22/46.04	10	4.8	4.5–5
20.10.2021 04:45:42	43.09/45.53	– “ –	4.9	5–5.5
07.11.2021 15:15:37	43.06/47.49	5	3.6	3–3.5
02.12.2021 23:22:56	42.99/47.06	– “ –	4.2	4.5–5
Арктический регион				
11.05.2021 20:06:34*	79.00/124.7	10	4.8	4.5–5
27.07.2021 06:17:57**	85.01/115.67	– “ –	4.7	– “ –
31.07.2021 01:29:55*	80.71/121.5	– “ –	– “ –	– “ –
07.08.2021 18:16:02**	85.49/88.76	– “ –	4.6	4.5
06.09.2021 17:31:23***	86.12/32.35	– “ –	5.1	5.5–6
01.10.2021 23:56:42**	84.30/99.83	– “ –	4.6	4.5
24.10.2021 17:47:51***	86.38/34.74	– “ –	4.7	4.5–5
29.12.2021 13:58:31**	85.11/92.41	– “ –	4.9	5–5.5
29.12.2021 20:25:57**	85.01/92.32	– “ –	4.5	4–4.5
31.12.2021 01:18:47**	85.15/92.13	– “ –	4.3	3.5–4
31.12.2021 01:44:16**	85.10/92.22	– “ –	– “ –	– “ –
*Восточнее Северной Земли; **Севернее Северной Земли; ***Севернее Шпицбергена				
Юг Сибири				
21.02.2021 01:37:08	52.36/97.41	10	5.2	5.5–6
02.04.2021 21:07:49	51.95/98.94	– “ –	4.2	3–4
12.08.2021 20:41:58	54.33/86.99	15	5	4.5–5
06.09.2021 07:47:20	53.24/99.07	10	5.2 (4.8)	6.5–7
06.09.2021 18:13:28	53.16/99.09	– “ –	3.9	2.5–3
22.10.2021 23:03:04	51.60/91.51	– “ –	5.2	5.5–6
Прибайкалье и Забайкалье				
11.01.2021 21:33:00	51.32/100.42	20	6.5 (7.2)	9–9.5
11.01.2021 22:02:57	51.3/100.41	10	5.3	6–6.5
11.01.2021 23:02:24	51.44/100.42	– “ –	5.2	5.5–6
12.01.2021 00:36:11	51.30/100.40	– “ –	4.8	4.5–5
13.01.2021 11:10:09	51.58/100.31	– “ –	4.9	5–5.5
14.01.2021 20:26:15	51.55/100.45	– “ –	4.6	4.5
18.01.2021 19:15:00	51.17/100.33	– “ –	– “ –	– “ –
15.02.2021 14:23:11	51.60/100.30	– “ –	4.9	5–5.5
31.03.2021 00:01:27	51.30/100.35	– “ –	5.4 (5.1)	7–7.5
15.04.2021 16:42:04	51.34/100.39	– “ –	4.8	4.5–5

Таблица 1. Продолжение

Дата Время (чч:мин:сс)	Широта/Долгота, N/E, град	Глубина, км	m_b (MS)	Ощутимость, баллы
24.04.2021 07:40:55	56.82/118.32	– “ –	4.7	5
03.05.2021 08:46:38	51.42/100.47	– “ –	5.8 (5.4)	7.5–8
11.05.2021 12:22:31	56.61/117.99	– “ –	4.9	5–5.5
19.07.2021 22:06:47	55.94/113.50	– “ –	4.7(3.8)	– “ –
31.08.2021 05:24:33	55.95/113.52	– “ –	5.3	6–6.5
22.09.2021 17:01:26	56.32/117.70	– “ –	5.5 (4.9)	6.5–7
23.09.2021 17:05:27	56.43/117.72	– “ –	4.6	4.5
26.10.2021 07:05:52	55.97/113.40	– “ –	– “ –	– “ –
15.12.2021 13:44:52	51.76/105.34	– “ –	4.9	5–5.5
Сахалин и прилегающие акватории				
28.01.2021 15:50:17	51.82/143.08	10	4.2	3–4
30.03.2021 05:04:37	46.44/142.10	– “ –	4.1	3–3.5
18.04.2021 08:16:51	50.85/142.65	– “ –	– “ –	4
18.04.2021 11:57:19	50.88/142.57	– “ –	3.7	2
17.06.2021 18:14:16	47.15/142.65	15	3.5	3–4
23.06.2021 12:26:32	47.40/142.80	10	3.8	3
23.06.2021 22:31:47	47.30/142.80	– “ –	3.9	– “ –
26.06.2021 19:43:39	50.89/141.72	5	4	4–5
Курило–Охотский регион				
04.02.2021 19:27:36	44.25/147.85	90	5.2	3
20.02.2021 13:23:26	43.33/147.13	60	5.5	3.5–4
02.03.2021 21:22:47	44.06/147.89	50	5.9 (5.8)	5.5–6
01.05.2021 01:27:26*	38.21/141.62	45	6.6 (6.6)	7–7.5
10.05.2021 00:39:46	43.26/147.06	60	4.8	2–3
13.05.2021 16:43:56	44.38/148.59	50	5	3
16.05.2021 03:23:56**	42.1/144.59	33	5.8	5.5
21.05.2021 05:01:25	44.58/148.29	60	4.8	3–4
27.05.2021 07:37:00	43.80/148.10	50	5	3–4
13.07.2021 00:30:18	46.20/151.61	60	5.7 (5.5)	5
26.07.2021 14:51:11	44.48/148.46	90	4.8	3
02.08.2021 03:28:59	44.14/148.42	33	5.5	4.5–5
24.08.2021 03:50:41	44.50/147.72	115	4.9	3
20.09.2021 20:25:28	46.33/152.56	55	6.1 (5.9)	5.5–6
05.10.2021 17:46:03*	40.10/142.24	60	6.3 (5.4)	4.5–5
16.10.2021 02:02:13	45.80/149.35	145	5.3	3
11.12.2021 21:34:14	43.28/146.45	50	4.8	4
21.12.2021 02:53:15**	43.82/145.9	100	5.4	– “ –
*Восточное побережье Хонсю, **Район Хоккайдо				
Якутия, Северо-Восток России и Чукотка				
13.12.2021 02:48:25	63.36/153.93	10	4.2	3.5
Камчатка, Северо-Курильские и Командорские острова				
11.01.2021 12:56:41	52.64/158.99	70	4.6	2–3
06.03.2021 05:57:57	50.70/157.74	40	5.5	4–5

Таблица 1. Окончание

Дата Время (чч:мин:сс)	Широта/Долгота, N/E, град	Глубина, км	m_b (MS)	Ощутимость, баллы
16.03.2021 18:38:26	54.73/163.3	60	6.6 (6.7)	6.5–7
11.04.2021 13:48:49	52.11/158.7	50	4.6	3–4
17.04.2021 15:45:23	54.14/160.45	90	5.3	3
18.04.2021 00:34:21	49.75/156.86	60	4.7	3–4
05.05.2021 14:08:43	52.00/159.28	70	4.5	2
09.05.2021 16:23:45	49.34/155.87	– “ –	4.8	2–3
12.05.2021 09:40:53	53.74/160.56	– “ –	4.1	– “ –
01.06.2021 08:08:52	50.84/156.46	145	5	3
06.06.2021 16:01:40	50.20/157.38	60	5.2	4–5
13.07.2021 02:28:59	52.54/160.22	50	5.7	4.5–5
14.07.2021 02:42:57	52.59/160.36	10	5.2	5.5–6
26.07.2021 16:11:23	53.05/158.59	150	4.8	3
14.09.2021 19:57:31	53.86/161.13	40	4.9	3–3.5
18.09.2021 11:17:27	50.64/159.15	75	4.4	3
06.10.2021 13:06:13	49.58/155.85	95	5.1	2–2.5
06.10.2021 14:30:38	52.71/159.58	60	4.7	2
17.10.2021 12:05:18	49.15/156.11	– “ –	5.2	3–3.5
18.10.2021 08:24:31	53.93/158.76	180	5.6	3
25.10.2021 23:39:22	49.87/155.84	70	4.8	– “ –
27.10.2021 02:42:32	57.97/153.11	10	5.4	6–6.5
31.10.2021 12:18:06	54.89/165.79	40	4.7	2.5–3
05.11.2021 15:27:12	49.93/157.09	80	4.9	2
12.12.2021 18:20:26	50.26/157.10	– “ –	4.5	4
30.12.2021 19:39:31	50.55/156.75	70	4.3	2–3

лов, 6 сентября в Иркутской области с интенсивностью сотрясения до 4–5 баллов и 22 октября в Республике Тыва с интенсивностью сотрясения до 4 баллов в близлежащих населенных пунктах [4].

На территории Прибайкалья и Забайкалья в рассматриваемый период наблюдений произошло 116 землетрясений с $m_b \geq 3.7$ (59 на территории Монголии), из них 51 ощутимое с $m_b \geq 3.7$ (23 на территории Монголии). Данные о 19 ощутимых событиях с магнитудой $m_b \geq 4.6$ (11 на территории Монголии) приведены в таблице. Самое сильное землетрясение произошло 11 января 2021 г. и имело магнитуду $m_b = 6.5$ ($MS = 7.2$). Его эпицентр располагался на глубине 20 км на территории Монголии в районе оз. Хубсугул, примерно в 45 км от границы с Россией, и вызвало интенсивность сотрясений в населенных пунктах Монды, Орлик – 6 баллов; Закаменск, Иркутск, Ангарск, Зима, Саянск, Бохан, Смоленщина, Кяхта – 5 баллов; Маркова, Усолье-Сибирское, Черемхово, Железногорск, Грановщина, Голубые Ели, Мишелевка, Шелехов, Куйтун, Михайлов-

ка, Свирск, Мегет, Никольск, Култук, Тулун, Гусиноозёрск, Средний, Баклаши, Чистые Ключи – 4–5 баллов; Нижнеудинск, Братск, Большое Голоустное, Вихоревка, Бирюсинск, Кодинск, Железногорск-Илимский, Улан-Удэ, Хомутово, Бай-Хаак, Большая Речка, Слюдянка, Залари, Александровское, Усть-Уда, Усть-Илимск, Заречный, Чеботариха, Максимовщина, Введенщина, Турма, Уховский, Карлук, Белореченский, Новая Игирма, Тайтурка, Байкальск, Кызыл, Малая Топка, Молодёжный, Оёк, Покровка, Пивовариха, Тайшет, Чунский, Петропавловка, Добролёт, Тельма, Жигалово, Казачье, Эрдэнэт (Монголия), Усть-Ордынский, Дзержинск, Егоровщина, Усть-Кут, Олха, Каменно-Ангарск, Олонки, Большая Елань, Алзамай – 4 балла; Киренск, Красноярск, Петропавловка, Кукуй, Сосновка, Магистральный, Петровск-Забайкальский, Юголок – 3–4 балла; Чита – 3 балла [5].

В 2021 г. на территории Приамурья и Приморья зафиксировано 4 землетрясения с $m_b \geq 3.8$, ощутимых не было. На глубине $h = 490$ зафиксировано одно землетрясение с $m_b = 4.4$.

На о. Сахалин и в прилегающей акватории Охотского моря в 2021 г. было зафиксировано 13 землетрясений с $m_b \geq 3.5$, из них 8 ощутимых с $m_b \geq 3.5$ (см. таблицу). Самое сильное землетрясение произошло 28 января и имело магнитуду $m_b = 4.2$. Его эпицентр располагался на глубине 10 км на о. Сахалин, оно вызвало интенсивность сотрясений в населенных пунктах Ноглики – 3–4 балла; Горячие Ключи – 3 балла. Два из зарегистрированных землетрясений произошло на глубинах 310 и 345 км, остальные на глубинах 5–15 км.

На территории Курило-Охотского региона зарегистрированы 183 землетрясения с магнитудой $m_b \geq 3.5$, из них – 38 ощутимых с магнитудами $m_b \geq 3.8$, которые сопровождались сейсмическими воздействиями в близлежащих населенных пунктах с силой до 5 баллов. Данные о 18 ощутимых землетрясениях с магнитудой $m_b \geq 4.8$ (4 на территории Японии) приведены в таблице. Самое сильное землетрясение произошло 20.09.2021 г. на глубине $h = 55$ км с $m_b = 6.1$ ($MS = 5.9$) в Тихом океане восточнее Курильских островов. Оно сопровождалось сейсмическими воздействиями в близлежащих населенных пунктах силой до 2–3 баллов.

В 2021 г. на обширной территории, включающей Якутию, Северо-Восток России и Чукотку, зарегистрировано 11 землетрясений с $m_b \geq 4.0$, из них – одно ощутимое землетрясение с магнитудой $m_b = 4.4$, оно ощущалось в Сеймчане силой 2 балла.

На территории Камчатки, Северо-Курильских и Командорских островов зафиксировано 226 землетрясений с $m_b \geq 3.4$, из них – 26 сопровождались сейсмическими воздействиями в близлежащих населенных пунктах с силой до 4–5 баллов (см. таблицу). Самое сильное землетрясение на глубинах очага $h \leq 70$ км произошло 16.03.2021 г. на глубине $h = 60$ км с $m_b = 6.6$ ($MS = 6.7$) в Тихом океане у восточного побережья Камчатки, оно ощущалось в Усть-Камчатске силой до 4–5 баллов по шкале ШСИ-2017 [4, 5]. Это землетрясение сопровождалось большим числом афтершоков. Самое сильное землетрясение на глубинах очага свыше 70 км произошло 18.10.2021 г. на глубине 180 км в восточной части Камчатки и имело магнитуду $m_b = 5.6$, оно ощущалось в Петропавловске-Камчатском силой 2–3 балла [4, 5].

ВЫВОДЫ

2021 год оказался весьма спокойным в сейсмическом отношении на территории России. Восьмой год подряд (2014–2021 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 Забайкалья – 116 событий (в 2020 г. – 36), из них ощутимых 51 (в 2020 г. – 21) за счет сильного землетрясения 11 января на территории Монголии на границе с Россией и последовавшем за ним афтершоковым процессом. Всего за период с 1 января по 31 декабря в оперативном режиме ССД ФИЦ ЕГС РАН на территории России и вблизи ее границ было зарегистрировано 702 землетрясения с $m_b \geq 3.1$.

Самыми сильными по магнитуде на территории РФ оказалось землетрясение, произошедшее 16.03.2021 г. на глубине $h = 60$ км с $m_b = 6.6$ ($MS = 6.7$) в Тихом океане у восточного побережья Камчатки, оно ощущалось в Усть-Камчатске силой 4–5 баллов, в селах Никольское и Крутоберегово – 4 балла, в Петропавловске-Камчатском и пос. Ключи – 3 балла, в Вилючинске – 2 балла [4].

Самым сильным по воздействию стало Хубсугульское землетрясение, произошедшее 11.01.2021 г. на территории Монголии в районе оз. Хубсугул, примерно в 45 км от границы Монголии с Россией с $m_b = 6.5$ ($MS = 7.2$). Наибольшая интенсивность сотрясений, оцениваемая в 6 баллов [5], наблюдалась в поселках Монды и Орлик.

Макросейсмические проявления в 2021 г. были отмечены для 140 землетрясений в 670 населенных пунктах России. Этот показатель выше аналогичного показателя за 2020 г. (111 землетрясений проявлялись для 232 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 13.01.2022).
2. Виноградов Ю.А., Рыжикова М.И., Пойгина С.Г., Петрова Н.В., Коломиец М.В. Сильные землетрясения земного шара в I полугодии 2021 г. по данным ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал, 2021. Т. 3. № 3. С. 7–27.
3. Землетрясения России в 2019 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. 213 с.
4. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.) // Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (дата обращения 11.01.2022).
5. Каталог землетрясений текущего года // Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. URL: <http://www.seis-bykl.ru/modules.php?name=Main&nowear=nowear#cat> (дата обращения 31.12.2021).

6. Маловичко А.А., Коломиец М.В., Рузайкин А.И. Сейсмичность России в 2020 году. // Геоэкология. 2021. № 4. С. 53–64.
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 2021

A. A. Malovichko^{a,#}, M. V. Kolomiets^{a,##}, and A. I. Ruzaykin^{b,###}

^a Federal Research Center for 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@gstras.ru

^{##}E-mail: kolmar@gstras.ru

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

Results on monitoring seismicity in 2021 are given for the main regions and territories of Russia: the Caucasus; East European Platform; Arctics; Altai and Sayan Mountains; Cis- and TransBaikal region; Amur 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 $I \geq 2.0$ points on SSI-2017 scale) that occurred in the territory of Russia is analyzed.

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

REFERENCES

1. База данных "Землетрясения" Службы срочных донесений. Информационные ресурсы 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.gstras.ru/new/infres/>. (accessed: 13.01.2022).
2. Vinogradov, Yu.A., Ryzhikova, M.I., Poigina, S.G., Petrova, N.V., Kolomiets, M.V. *Sil'nye zemletryaseniya zemnogo shara i Rossii v I polugodii 2021 g. po dannym FITS YEGS RAN* [Strong earthquakes of the globe and Russia in the first half of 2021 according to the Federal Research Center of the EGS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, 2021, vol. 3, no. 3, pp. 7–21. (in Russian)
3. *Zemletryaseniya Rossii v 2019 g.* [Earthquakes in Russia in 2019]. Obninsk, GS RAS, 2021, 213 p. (in Russian)
4. *Katalog zemletryaseni Kamchatki i Komandorskikh ostrovov (1962 g. – nast. vr.)* [Catalogue of earthquakes of Kamchatka and the Commander Islands (1962 – present)]. Unified Information System of seismological data of the CF FIC EGS RAS. URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php> (accessed 11.01.2022). (in Russian)
5. *Katalog zemletryaseni 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> (accessed: 31.12.2021).
6. Malovichko, A.A., Kolomiets, M.V., Ruzaikin, A.I. *Seismichnost' Rossii v 2020 godu* [Seismicity in Russia in the year 2020]. *Geoekologiya*, 2021, no. 4, pp. 53–64. (in Russian)
7. Malovichko, A.A., Starovoi, O.E. *Geofizicheskaya sluzhba RAN: sostoyanie i razvitie* [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. Starovoi, 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. Starovoi, 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)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

**КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
“ЭКСТРЕМУМ” ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
ВОСТОЧНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА**© 2022 г. Н. И. Фролова^{1,*}, И. П. Габсатарова^{2,**}, С. П. Сушев^{3,***}, Н. С. Малаева¹¹ Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия² Федеральный исследовательский центр “Единая Геофизическая Служба РАН” (ФИЦ ЕГС РАН), Ленина пр., д. 189, Обнинск, Калужская обл., 249035 Россия³ Московский Государственный Технический Университет им. Баумана (МГТУ), 2-я Бауманская ул., д. 5, Москва, 105005 Россия

*E-mail: frolovanina7@gmail.com

** E-mail: ira@gstras.ru

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

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 05.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Настоящее исследование направлено на калибровку моделей, используемых в системе “Экстремум” для расчета возможных потерь от сильных землетрясений. Исследуются параметры макросейсмического поля в восточной зоне Северного Кавказа по материалам землетрясений прошлого века. Район исследования расположен в сопредельной области северных структур Большого Кавказа и Терско-Каспийского прогиба. Этот высокосейсмичный район, административно относящийся к Чеченской Республике и Республике Дагестан, известен проявлением землетрясений магнитуды $M = 6.2-6.4$ в 1976 г. и $M = 5.0-5.3$ в 1966, 1969 и 1984 г. Проведенные исследования позволили расширить границы выделенной в 2019 г. зоны с “квазистойчивыми” параметрами макросейсмического поля на восточном Кавказе, которая простиралась в основном, в пределах очаговой зоны Дагестанского землетрясения 1970 г. и ближайшего окружения, а затем была продлена до эпицентральной зоны Курчалойского землетрясения 2008 г. При исследовании выполнено сравнение наборов основных параметров землетрясений и параметров макросейсмического поля, полученных различными центрами и авторами ранее, учтены направленность излучения и расположение действующего сейсмогенного разлома земной коры. Сопоставлены наблюдаемые и расчетные значения сейсмической интенсивности, полученные с помощью системы “Экстремум”. Результаты калибровки дополнили множество наборов калибровочных данных, используемых для эффективной оперативной оценки последствий землетрясений. Их рекомендуется применять при оценке параметров обстановки системой “Экстремум” в зоне влияния разрушительных землетрясений на территории республик Северного Кавказа – Чеченской и Дагестана.

Ключевые слова: оперативные оценки потерь от землетрясений, калибровка модели макросейсмического поля, Владикавказский разлом, зона ВОЗ, квазистойчивые параметры, информационная система “Экстремум”

DOI: 10.31857/S0869780922040014

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость предотвращения катастрофических последствий землетрясений побуждает исследователей постоянно проводить работы по совершенствованию методов оценки сейсмической опасности. Настоящее исследование продолжает цикл работ авторов, направленных на калибровку геоинформационной системы “Экстремум”, применяемой в Национальном центре по управлению кризисными ситуациями МЧС РФ для оперативной оценки возможных потерь от

сильных землетрясений, методические основы таких работ изложены в [11, 12, 31–33].

Рассматриваемый район принадлежит к сейсмически активному Альпийско-Гималайскому поясу, на примере землетрясений в котором авторами уже неоднократно проводились исследования по калибровке системы “Экстремум” [33–35] и, бесспорно, заслуживает всестороннего изучения. Предметом настоящей работы являются сильнейшие землетрясения на территории Чеченской Республики (ранее Чечено-Ингушетии)

и Республики Дагестан: Дагестанское 1970 г., Черногорское 1976 г. и Курчалойское 2008 г. Ранее в работах авторов было показано, что эпицентральные зоны Дагестанского и Курчалойского землетрясений по параметрам макросейсмического поля могут быть объединены в одну зону квазиустойчивых параметров [33]. В 2020–2021 гг. очаговая зона Черногорского землетрясения 1976 г. активизировалась проявлением нескольких ощутимых событий с $M = 4.0–4.8$, что побудило авторов вновь обратиться к территории Восточного Кавказа. Впервые для целей калибровки будет рассмотрено Черногорское землетрясение 1976 г.

При оценке возможных потерь и ущерба от будущих землетрясений при калибровке параметров моделей, используемых для расчета, весьма показательный эффект дает использование сценарийных событий, для которых могут выбираться ранее произошедшие сильные землетрясения в регионе или наиболее опасные события согласно картам зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), которые строятся при Общем сейсмическом районировании (ОСР) [29] и при детальном сейсмическом районировании (ДСР) [26]. Основанием к выбору в качестве сценарийных событий по положению очагов уже известных сильных землетрясений являются факты обнаружения в очаговых зонах современных сильных землетрясений древних аналогов с близкими значениями магнитуды благодаря исследованиям, например, палеосейсмодислокаций [26]. Так, Дагестанское землетрясение 1970 г. произошло в эпицентральной зоне другого сильного сейсмического события – 09.03.1830 г. ($M = 6.3$, $h = 16$ км) [19]. Землетрясение 1830 г. ощущалось на большой территории Северного Кавказа и частично Закавказья: от Астрахани до Тбилиси и от Краснодара до Дербента. В эпицентральной области интенсивность сотрясений составила 8–9 баллов [18, 19]. Древние сейсмогенные оползни были выявлены и в 8-балльной плейстосейстовой области Черногорского землетрясения 1976 г. [14]. Кроме того, в качестве сценарийных событий выбираются и прогнозные потенциальные очаги землетрясений на Кавказе, например, показанные в работе [39].

Цель настоящего исследования (кроме прямого расчета возможного эффекта от землетрясения подобного по магнитуде Черногорскому 1976 г.) – уточнение уравнения макросейсмического поля и возможное расширение выделенной ранее зоны квазиустойчивых параметров в восточной части Северного Кавказа для систематизации имеющихся моделей расчета возможных потерь от землетрясений, применяемых в системе “Экстремум”.

Полученный в результате исследований эффект будет проиллюстрирован на расчетах возможных степеней повреждений застройки в наиболее крупных населенных пунктах Чеченской

Республики и Республики Дагестан в случае возникновения сценарийных землетрясений в этой зоне.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Восточный Кавказ справедливо считается сейсмически наиболее активным на Кавказе, о чем говорят имеющиеся сведения об исторических землетрясениях этого района [17, 19, 26]. Сейсмическая активность связана, в первую очередь, с четким геологическим и морфологическим разграничением Терско-Каспийского прогиба и Большого Кавказа на всем их протяжении и сочленением этих крупнейших тектонических элементов. В Предкавказье на молодой Скифской платформе также, как и на Большом Кавказе, преобладают разрывные нарушения запад-северо-западной ориентировки [26, 39], это будет использовано в качестве дополнительного признака направленности разрыва, отображаемого в вытянутости изосейст для всей исследуемой зоны. Мезозойские и более молодые отложения зоны Известнякового Дагестана надвинуты на Терско-Каспийский краевой прогиб по пологой поверхности, падающей к югу. С этой зоной связаны уже упомянутые сильные землетрясения 1830 и 1970 г. с $M = 6.3–6.6$ и многочисленные, более слабые толчки, в связи с чем она рассматривается под названием сейсмофокальной области Дагестанского клина [4].

Дагестанское землетрясение 1970 г. хорошо изучено [8]. Сейсмичность области Дагестанского клина после землетрясения 1970 г. резко возросла и оставалась на значительно более высоком, чем прежде, уровне, даже 20 лет спустя. По мнению С.С. Арефьева объяснением этого явления может служить то, что это землетрясение было предельным, максимально возможным для данной области и вызвало сильную перестройку напряженного состояния горных пород, выразившуюся в увеличении фоновой сейсмической активности [5]. Такой ситуации не наблюдалось после Черногорского землетрясения 1976 г., произошедшего в Черных горах, простирающихся вдоль Владикавказского (Черногорского¹) субширотного глубинного разлома, что предполагало возможное проявление в этой зоне еще более сильного события. По мнению [23], сильные землетрясения обычно приурочены к дизъюнктив-

¹ Черногорский (Владикавказский) глубинный разлом, названный дагестанскими геологами еще и Восточно-Мугринским, трассируется на западном погружении Дагестанского выступа, огибая Талгинский купол, пересекает Карабудахкентскую структуру, Салтабакскую структурную террасу по восточному борту Западной антиклинальной зоны, уходит до границ с Азербайджаном.

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения на территории Восточного Кавказа

Дата	Координаты	Магнитуда, M	Интенсивность MSK-64, балл	Название
09.03.1830	43.0 47.0	6.3	8–9	Дагестанское-I
10.08.1912	43.5 45.1	5.7	8	Терское (Эльдаровское)
05.10.1928	42.8 45.6	4.7	7	Аргунское
24.10.1933	42.9 45.9	5.2	7–8	Веденовское
02.03.1966	43.03 45.71	5.0	7	Аргунское-II
17.06.1969	43.27 45.19	5.1	7 (6–7)	Ачхой-Мартановское
14.05.1970	43.00 47.09	6.6	9 (8–9)	Дагестанское
22.11.1971	41.23 48.38	5.5	7	Старогрозненское
23.12.1974	42.95 46.82	5.0	7	Салатаусское
28.07.1976	43.1 45.5	6.2 (6.4)	8–9	Черногорское
03.08.1989	43.49 45.23	5.0	7	Горагорское
11.10.2008	43.24 46.17	5.6 (5.8)	8	Курчалойское
12.12.2020	43.037 45.542	4.8	5–6	

ным узлам (на исследуемом участке это пересечение диагональной Даттых-Ахловской шовной зоны [15, 16] и Владикавказского (Черногорского) разлома) и к зонам глубинных разломов большой протяженности, каким является Владикавказский (Черногорский) разлом.

Наиболее сильные землетрясения исследуемой зоны приведены в табл. 1. Большая часть названных землетрясений произошла в высокосейсмичной Терско-Сунженской сейсмогенерирующей области [15, 16] и в зоне Дагестанского клина.

Эпицентр Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. (с магнитудой по разным оценкам от 6.2 до 6.4 и интенсивностью в эпицентре 8–9 баллов) находился в горах, в безлюдной местности, однако в близлежащих селах наблюдался разрушительный эффект, максимально достигший 8 (местами до 9) баллов в селении Чожи-Чу и 7 (местами до 8) баллов в нескольких немного более удаленных селах. Дагестанские сейсмологи выезжали в эпицентральную зону и опубликовали результаты наблюдений Черногорского землетрясения 28 июля 1976 г. в Трудах Дагестанского филиала АН СССР [14]. Этими данными мы воспользуемся для калибровки системы “Экстремум” и моделирования возможных последствий от такого уровня землетрясений в южной части территории Чеченской Республики (ЧР).

Макросейсмические сведения о части землетрясений участвовали в уточнении коэффициентов макросейсмического поля в работе [33]. Другая часть из них, а именно, ближайšie к эпицентру Черногорского землетрясения 1976 г., Аргунское, 1966 г., Ачхой-Мартановское 1969 г.,

4.03.1984 г., 03.08.1989 г. и 12.12.2020 г., участвовали в уточнении параметров макросейсмического поля, применительно к району Черногорского землетрясения. Полученный результат описан ниже в самостоятельном разделе.

ЗОНЫ ВОЗ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Зоны ВОЗ являются сеймотектонической основой карт сейсмической опасности и могут быть использованы для основы зонирования территории. Согласно зонированию территории в системе АИУС РСЧС² [13], территория ЧР относится к зоне пересечения сейсмолинементов с $M_{\max} = 6.5$, имеющих кавказское направление и диагональное к нему, по линейментно-доменно-фокальной модели (ЛДФ-модель) зон ВОЗ [29].

По более детальным оценкам [15, 16] большая часть территории ЧР относится к зонам ВОЗ ($M_{\max} = 6$), центральная ее часть к $M_{\max} = 6.5$, а с юга и востока территории соседствуют зоны с $M_{\max} = 7$. Последние по времени уточненные оценки [26] относят большую часть территории ЧР к зоне $M_{\max} = 6.3$, северную ее часть – к $M_{\max} = 6$. Существуют и другие варианты зон ВОЗ для этой территории. Рассмотрим их с целью возможного

² АИУС РСЧС – Автоматизированная Информационная Управляющая Система Российской системы чрезвычайных ситуаций – система сбора, комплексной обработки оперативной информации о чрезвычайных ситуациях и информационного обмена между различными подсистемами и звеньями РСЧС, передачи органами повседневного управления необходимых указаний силам и средствам ликвидации чрезвычайных ситуаций.

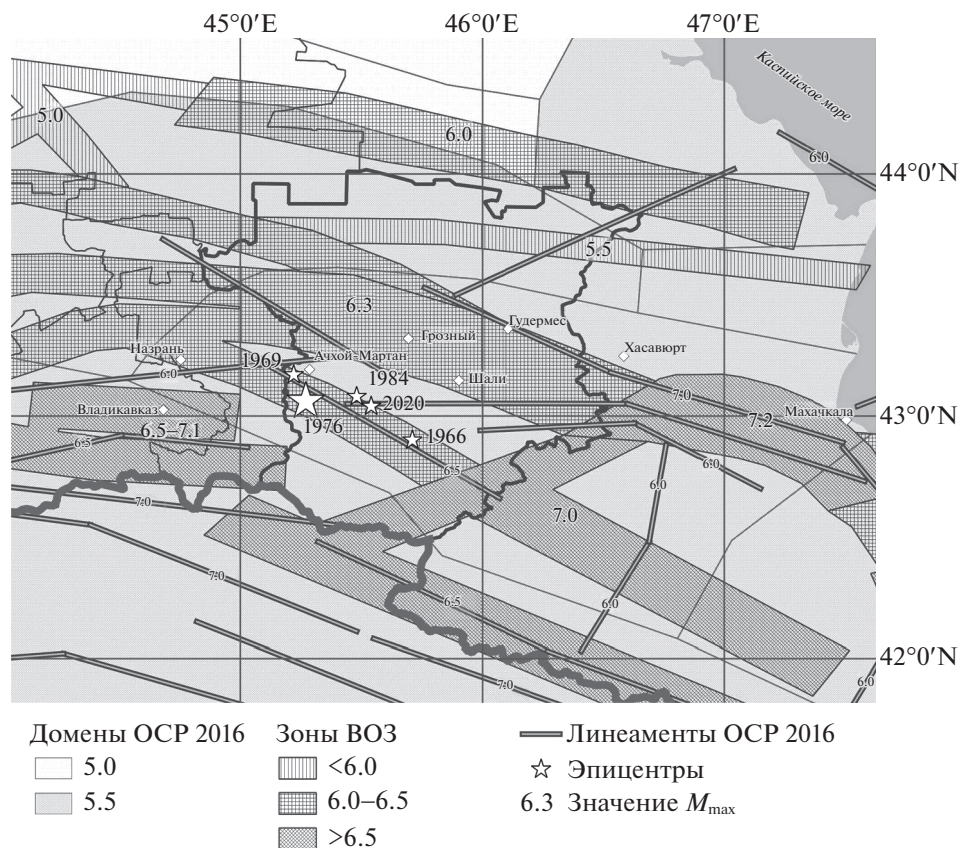


Рис. 1. Наложение зон ВОЗ по [26] на карту доменов и линеаментов по [20]. Звездами показаны эпицентры землетрясений в исследуемой зоне.

применения для расширения границ “калибровочной” области в восточной части Северного Кавказа.

Рассмотрим оценки M_{max} по внерегиональному сеймотектоническому методу [23]. Суть метода заключается в проведении независимого от сейсмологических данных геодинамического районирования земной коры с привлечением признаков, характеризующих ее современное строение и состояние, и с применением кластерного анализа комплекса геолого-геофизических данных. Результаты такого районирования сопоставляются с имеющимися сейсмологическими материалами, и для каждой геодинамической обстановки выявляется своя величина M_{max} . При построении карты M_{max} Кавказа впервые в полной мере был реализован учет всех многочисленных и разнородных по содержанию данных (геологических, геофизических, геодезических, дешифрированных космических снимков), характеризующих условия возникновения очагов землетрясений [39]. В этой работе даются максимальные оценки $M_{max} = 7.1$ вблизи зоны, где было зарегистрировано Черногорское землетрясение 1976 г. Эти данные мы можем использовать для обоснования

максимальной магнитуды сценарийного землетрясения в исследуемом нами районе.

Предстоит решить задачу как можно более широкого зонирования территории для оперативной оценки возможной силы землетрясения и расчета потерь от него с использованием обобщенных параметров модели. Поэтому рассмотрим другие варианты построения зон ВОЗ в сравнении с ЛДФ-моделью оценки вероятностной сейсмической опасности региона Крым–Кавказ в виде зон ВОЗ, подготовленной для карты Общего сейсмического районирования ОСР [30].

В [24, 26] карты сейсмической опасности для Северного Кавказа разработаны в масштабе, близком к масштабу ДСР. Была составлена схема зон ВОЗ посредством выделения и картирования по геологическим и геодинамическим данным активных тектонических структур на рассматриваемой территории; в результате была создана ее сеймотектоническая модель с оценкой сейсмического потенциала M_{max} . Для исследуемого района представим эту зону ВОЗ в сопоставлении доменов и линеаментов ОСР-2016 (рис. 1). Значительная часть зон ВОЗ вокруг исследуемых землетрясений попадает в одну доменную струк-

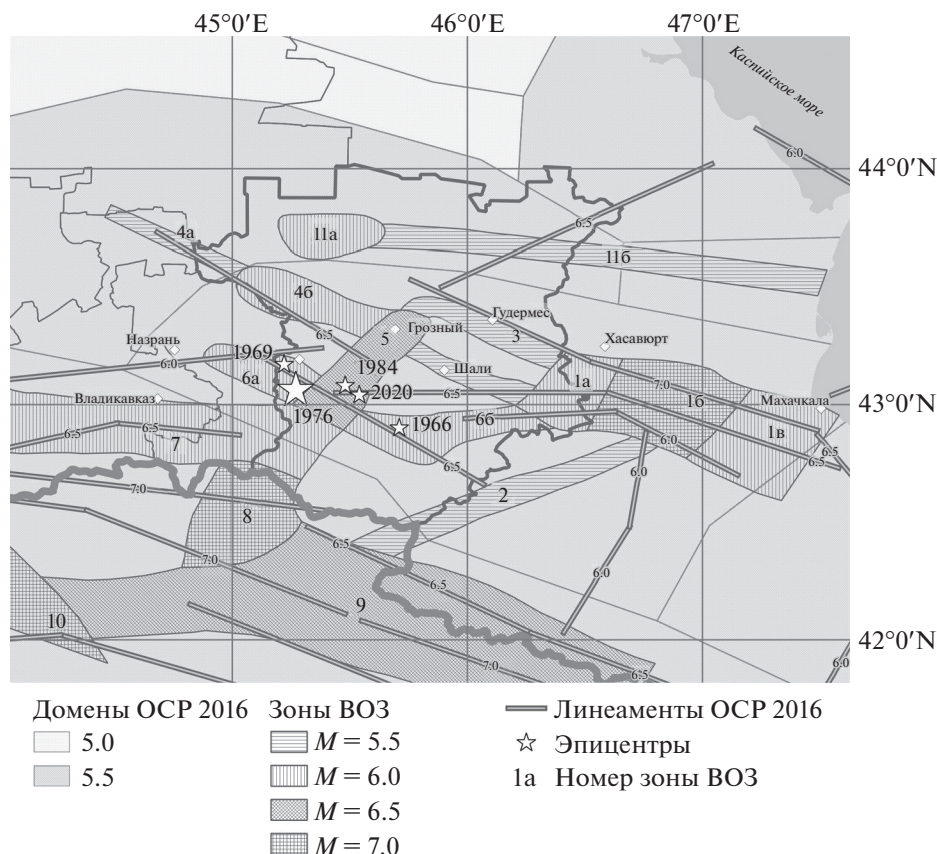


Рис. 2. Наложение зон ВОЗ по [15, 16] на карту доменов и линеаментов по [20]. Звездами показаны эпицентры землетрясений в исследуемой зоне. Зоны ВОЗ: 1 – Махачкалинская (1а – Хасавюртский участок $M_{\max} = 6.0$, 1б – Буйнакский узел $M_{\max} = 7.0$); 2 – Андий Койсуйская $M_{\max} = 5.5$; 3 – Гудермесская $M_{\max} = 5.5$; 4 – Бенойско-Эльдаровская (4а – Моздокская $M_{\max} = 6.0$, 4б – Горагорский узел $M_{\max} = 6.0$); 5 – Черногорская $M_{\max} = 6.5$; 6 – Даттых-Ахловская (6а – Серноводский участок $M_{\max} = 6.0$, 6б – Аргунский участок $M_{\max} = 6.0$); 7 – Владикавказская зона $M_{\max} = 6.0$; 8 – Борисахская $M_{\max} = 7.0$; 9 – зона Водораздельного хребта $M_{\max} = 6.5$; 10 – Джава-Лечхумская $M_{\max} = 7.0$; 11 – Северная краевая (южная ветвь) (11а – Наурский узел $M_{\max} = 6.0$; 11б – Старогладковский участок $M_{\max} = 5.5$).

туру (тонкие серые линии на рис. 1), расположенную в центральной части ЧР и Республики Дагестан и простирающуюся западнее и южнее ранее выделенной нами зоны при калибровочных работах в 2019 г. [33].

Несколько более дифференцирована карта зон ВОЗ, составленная при комплексном обследовании г. Грозный и его окружения в 1996 г. (рис. 2), однако и в этом случае зоны ВОЗ для исследуемых землетрясений можно объединить границами одного домена.

Положение эпицентра землетрясения 1976 г. связано с дизъюнктивным узлом и комбинацией двух зон противоположной ориентации – № 5 и № 6.

Зона № 5 по [15, 16] – “Черногорская зона ВОЗ своей северной частью непосредственно захватывает территорию г. Грозного. Она связана с субмеридиональной зоной поперечного дробления, имею-

щей глубокое заложение. Здесь происходит пересечение тектонических структур кавказского и антикавказского простираения. Сильные очаги этой зоны относятся к нижнекоровым ($h > 25$ км), что несколько умеряет их сейсмическую опасность. Однако для нее характерны и слабые приповерхностные очаги, способные создавать в небольшой эпицентральной зоне сейсмический эффект до 7 баллов”. Прогнозная $M_{\max} = 6.5$.

Зона № 6 – Даттых-Ахловская зона ВОЗ, разделяется Черногорской зоной на два участка: западный – Серноводский (6а) и восточный – Аргунский (6б). Она примыкает к южной части Черногорской зоны и связана с погребенными разломами приблизительно кавказского простираения. Очаги землетрясений этой зоны подразделяются на нижнекоровые и верхнекоровые, причем нижнекоровые характерны только для Серноводского ее участка (6а). Максимальные наблюдаемые магнитуды: на Серноводском

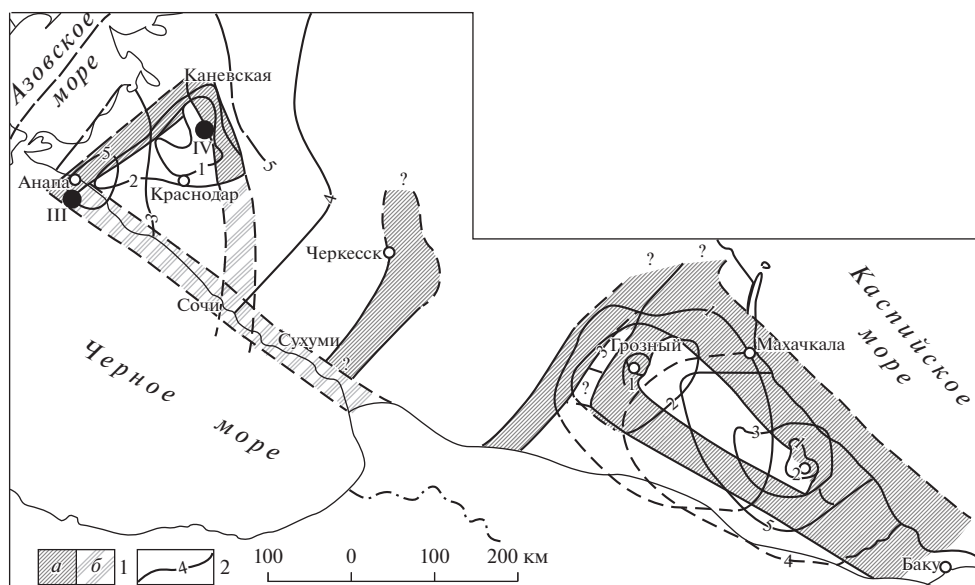


Рис. 3. Схема расположения сейсмогенных зон Большого Кавказа по И.В. Ананьину [3]. 1 – сейсмогенные зоны: *a* – по коэффициентам затухания, *b* – по геофизическим данным; 2 – изосейсты землетрясений.

участке – $M = 5.4$ (1981 г.) на Аргунском участке – $M = 5.2$ (1933 г.). Обоим участкам зоны приписана $M_{\max} = 6.0$.

Таким образом, высказано предположение о глубине возможных очагов в исследуемой зоне, далее при расчетах будут рассмотрены варианты с разной глубиной очага Черногорского землетрясения 1976 г.

УТОЧНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗОНЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расширение зоны калибровки для восточной зоны Северного Кавказа связано также с условием однородности макросейсмического поля. Связь распределения макросейсмических проявлений с геологическим строением была проанализирована И.В. Ананьиним [2], и построена схема расположения сейсмогенных зон Большого Кавказа (рис. 3). Таким образом, довольно большая область Восточного Кавказа может характеризоваться близкими значениями коэффициентов затухания макросейсмического поля. Это следует проверить на новых данных, не учтенных ранее И.В. Ананьиним [3].

Были собраны сведения о макросейсмическом проявлении четырех землетрясений в исследуемой зоне. Карты-схемы их изосейст приведены на рис. 4–7. Таблицы, содержащие названия пунктов и соответствующие им значения баллов, были использованы для построения графика затухания балльности с расстоянием (рис. 8). Предварительно для всех населенных пунктов были

уточнены географические координаты, единообразно рассчитаны эпицентральные и гипоцентральные r расстояния. В работе [22] при оценке параметров уравнения макросейсмического поля применялся метод объединения сведений о макросейсмических проявлениях совокупности близко расположенных сейсмических событий, компенсирующий недостаток землетрясений, которые могут использоваться в качестве опорных. Такой же подход был использован в данной работе. Особое значение имеют точность и однородность инструментального определения магнитуды. В нашем исследовании в качестве магнитуды M использовались магнитуды MLH или M_s .

Следует заметить, что для исследуемой серии землетрясений характерен недостаток данных наблюдений в южной части относительно эпицентральных зон, что объясняется труднопроходимостью горной территории и малым числом населенных пунктов в Черных горах, в пределах Главного и Бокового хребтов Большого Кавказа [7].

Общая черта в положении изосейст этих землетрясений – вытянутость в направлении запад-северо-запад, что совпадает с направлением ориентировки в известных разрывных нарушениях, отмечаемых геологами [26, 39].

На рис. 8 приводится график $I - 1.5M = f(lg r)$, построенный по методу объединения сведений о макросейсмических проявлениях совокупности близко расположенных сейсмических событий [22].

Для построения графика использовались данные 320 объектов в виде пунктов с определенной

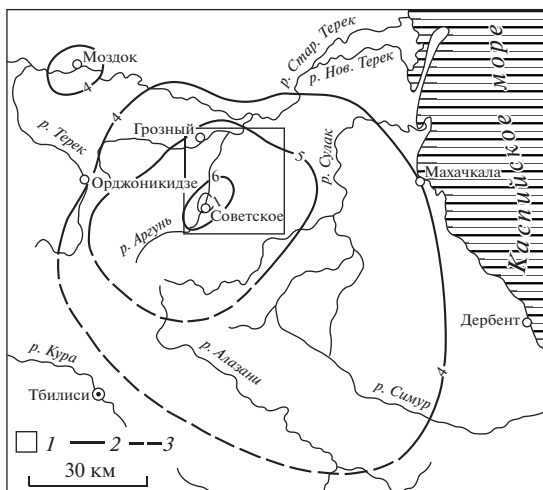


Рис. 4. Схема изосейст Аргунского землетрясения 02.03.1966 г. [2]: 1 – контуры детально рассмотренной области; 2 – изосейсты; 3 – изосейсты предполагаемые.

бальностью, удаленных от эпицентров на расстояния от 2 до 240 км.

В аналитическом виде зависимость интенсивности I от магнитуды и гипоцентрального расстояния r в соответствии с графиком (см. рис. 8) представляется формулой:

$$I = 1.5M - 3.63(\pm 0.11) \lg r + 3.21 (\pm 0.20), \quad (1)$$

$$R = 0.88.$$

Для сравнения приведем формулы:

– Н.В. Шебалина для Дагестана [19, 38]

$$I = 1.5M - 3.6 \lg r + 3.1, \quad (2)$$

– Н.В. Шебалина для Северного Кавказа [19, 38]

$$I = 1.6M - 3.1 \lg r + 2.2, \quad (3)$$

– уточненную для Северного Кавказа [33]

$$I = 1.5M - 3.1 \lg r + 2.23, \quad (4)$$

– полученную ранее в [33] при калибровке в восточной зоне Северного Кавказа

$$I = 1.5M - 3.62(\pm 0.24) \lg r + 3.16(\pm 0.36). \quad (5)$$

Как видно, коэффициенты уравнений (1)–(3) почти идентичны в пределах ошибок определения. Таким образом, результаты проведенных работ позволяют продлить ранее выделенную область калибровки восточной зоны Северного Кавказа западнее и южнее (рис. 9).

ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В настоящей статье для калибровки параметров модели макросейсмического поля используется ранее разработанная авторами процедура [31, 33–35], предусматривающая подбор приемлемых, устойчивых для рассматриваемой терри-

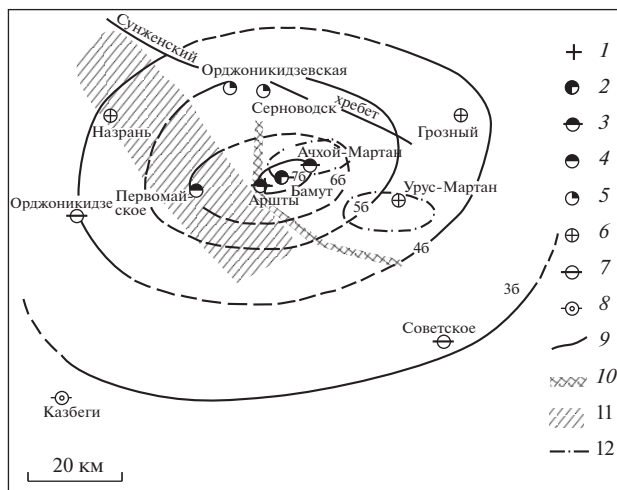


Рис. 5. Схема изосейст Ачхой-Мартановского землетрясения 17.06.1969 г. с элементами сеймотектонической схемы: 1 – эпицентр по макросейсмическим данным; интенсивность в баллах: 2–7, 3–6–7, 4–6, 5–5, 6–4, 7–3–4, 8–2–3; 9 – изосейсты; 10 – гравитационная ступень; 11 – Датыхско-Ахловский древний горст; 12 – вторичные впадины в Сунженской долине [27].

тории значений параметров математической модели затухания сейсмической интенсивности. В качестве таких параметров предложено использовать:

– коэффициенты уравнения b, v, c макросейсмического поля [36, 38]:

$$I = bM - v \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \quad (6)$$

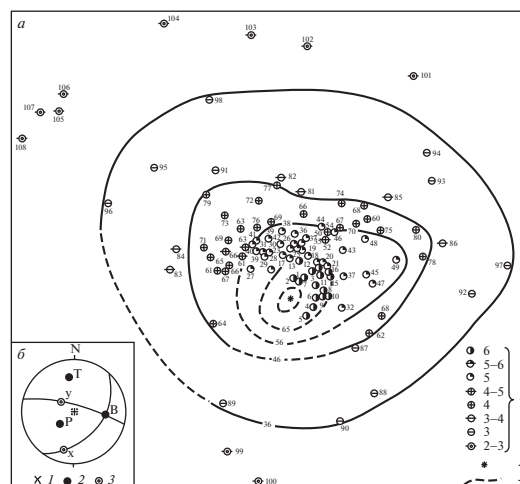


Рис. 6. Схема изосейст главных толчков 4.03.1984 г. (а): 1 – бальность; 2 – макросейсмический эпицентр; 3 – изосейста; б – диаграмма механизма очага: 1 – нодальная плоскость; 2 – оси главных напряжений; 3 – оси подвижек [1].

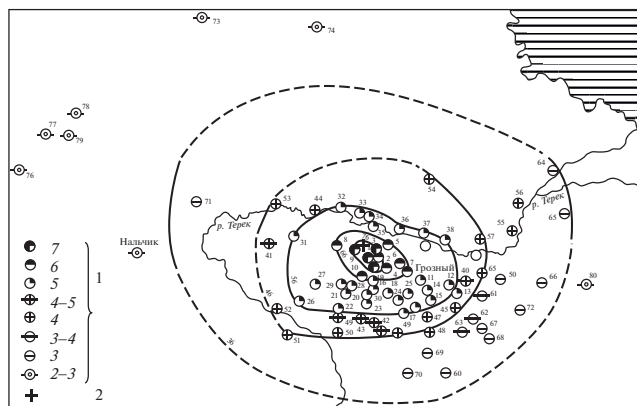


Рис. 7. Схема изосейст землетрясения 3.08.1989 г.: 1 – балльность; 2 – инструментальный эпицентр 03.08.1989 г. [6].

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

Ранее авторами были изучены особенности затухания для отдельных зон на территории РФ и сопредельных стран [32–35]. Для территории Кавказа для калибровки использовались сведения об осязутимости 32 сильных землетрясений с $I \geq 6$ 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 [10, 29].

В результате исследований были установлены стабильные параметры макросейсмического поля для района, границы которого включают территорию Дагестанского клина с продолжением на северо-запад от 48° до 45.5° E. Для выделенной зоны рекомендован следующий набор стабильных параметров поля: $b = 1.5$, $v = 3.62$, $c = 3.16$, $k = 1.55$; 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 эффективность калибровки моделей системы “Экстремум” [33]. В целом погрешность в определении интенсивности не превысила 0.3–0.5 балла. Значения погрешностей ΔI_{cp} в прогнозировании интенсивности от контрольных землетрясений варьировались от 0.1 на эпицентральных расстояниях меньше 25 км и до 0.3 на расстояниях более 100 км.

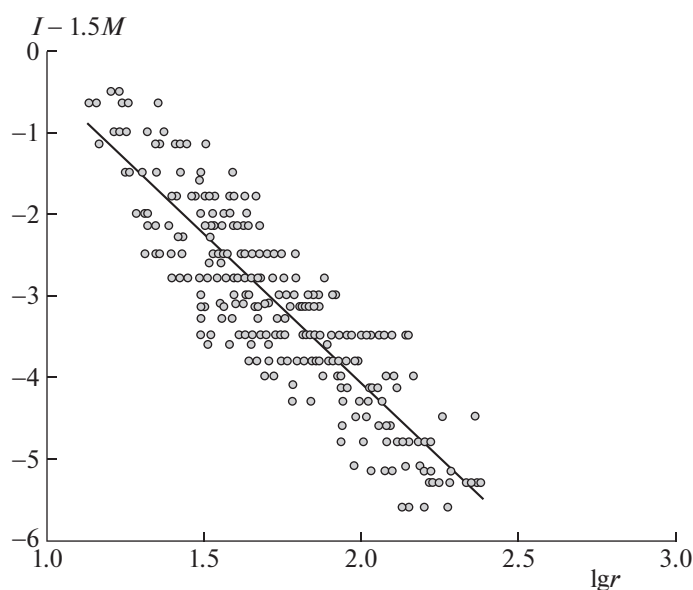


Рис. 8. Объединенный график зависимости разницы $I - 1.5M$ от логарифма гипоцентрального расстояния для землетрясений зоны Черногорского землетрясения 1976 г.

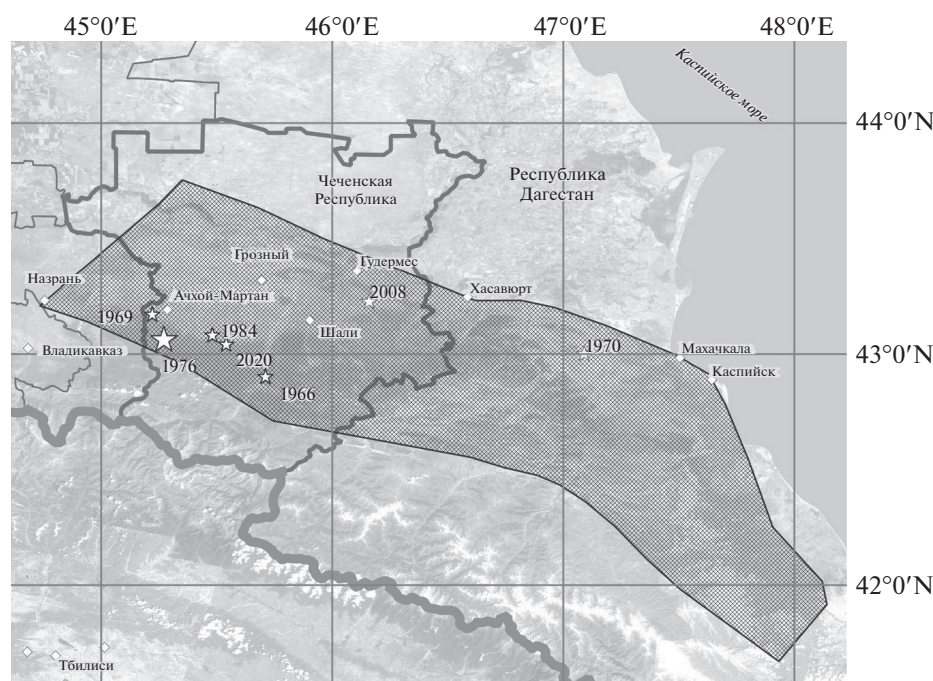


Рис. 9. Зона в восточной части Северного Кавказа с квазиустойчивыми параметрами макросейсмического поля для моделирования последствий в режиме времени, близком к реальному.

РАСЧЕТ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧЕРНОГОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 1976 г.

Для исследования применимости описанных выше параметров поля для рассматриваемого

района Кавказа выполнены расчеты последствий Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. в ЧР. В табл. 2 приведены варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения с помо-

Таблица 2. Варианты исходных данных для расчета последствий землетрясения в восточной зоне Северного Кавказа по данным Черногорского землетрясения 1976 г.

№	Параметры события	Уравнение макросейсмического поля	Ориентация поля ζ и коэффициент сжатия k
1	43.0° N; 45.2° E; $M = 6.4$; $h = 16$ км макросейсмический эпицентр по [14]	ф. (3)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
2	—”—	ф. (2)	—”—
3	—”—	ф. (1)	—”—
4	—”—	ф. (5)	$\zeta = 115^\circ$; $k = 1.55$
5	—”—	ф. (4)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
6	—”—	ф. (1)	$\zeta = 107^\circ$; $k = 1.5$
7	43° N; 45.27° E; $M = 6.4$; $h = 25$ км [21]	Та же	Вдоль ближайшего разлома; $k = 1.5$
7a	43.06° N; 45.27° E; $M = 7.1$; $h = 25$ км	—”—	—”—
8	43.06° N; 45.27° E; $M = 6.4$; $h = 25$ км [21]	—”—	Вдоль разлома; $k = 1.5$
9	—”—	ф. (5)	$\zeta = 115^\circ$; $k = 1.55$
10	42.95° N; 45.56° E; $M = 6.4$; $h = 16$ км (макросейсмический эпицентр – авторов)	ф. (2)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
11	—”—	ф. (1)	$\zeta = 115^\circ$; $k = 1.55$
12	—”—	ф. (5)	—”—
13	—”—	ф. (4)	Вдоль разлома; $k = 1.5$
14	—”—	ф. (1)	Вдоль ближайшего разлома; $k = 1.5$
14a	42.95° N; 45.56° E; $M = 7.1$; $h = 16$ км (макросейсмический эпицентр – авторов)	Та же	—”—

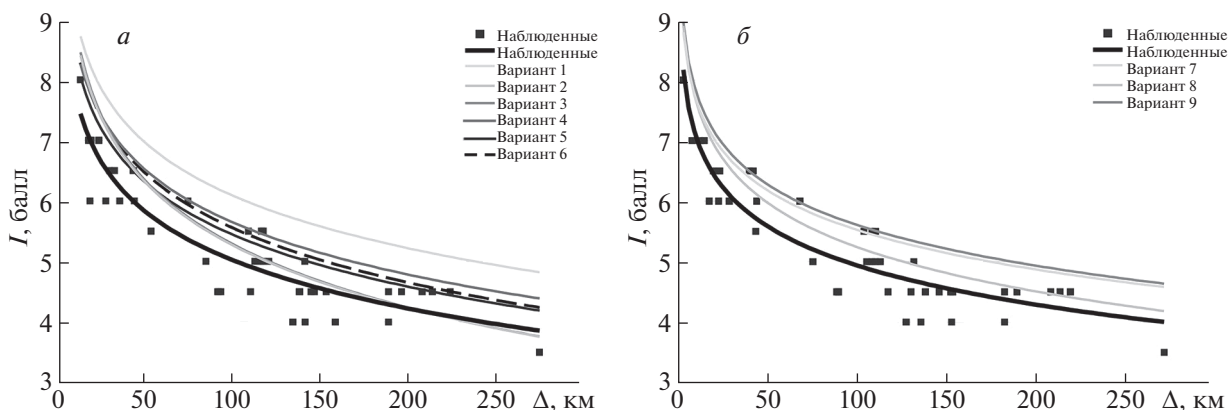


Рис. 10. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей: а – варианты 1–6; б – варианты 7–9 (см. табл. 2).

стью системы “Экстремум”. Расчеты выполнялись для макросейсмических параметров очага события [14] и параметров события по Дагестанскому каталогу [21]. В качестве коэффициента сжатия k использовались значения 1.5 и 1.55. Рассматривались разные ориентации: вдоль ближайшего разлома, под углом 115° в соответствии с ранее установленной ориентацией для откалиброванной зоны на Кавказе [33] и под углом 107° в соответствии с решением механизма очага [40]. Расчетные значения интенсивности сравнивались с наблюдаемыми значениями, опубликованными в работе [14].

На рис. 10а приведены результаты расчета интенсивности сотрясений I для параметров макросейсмического очага по данным [14], на рис. 10б – для параметров события по [21].

Расчетные значения интенсивности при использовании коэффициентов уравнения макросейсмического поля для Северного Кавказа [36, 37] значительно превышают наблюдаемые значения на эпицентральных расстояниях больше

100 км $\Delta I > 1$ балла (см. вариант 1, табл. 2). По вариантам 2–6 (см. табл. 2) получены незначительно завышенные оценки расчетных интенсивностей ($\Delta I < 0.3$ балла) в ближней зоне до 50–60 км. На расстояниях свыше 60 км наименьшая разница $\Delta I < 0.1$ –0.2 балла получена для варианта 2 и 3 при использовании уточненных параметров поля для Северного Кавказа [33] и уравнения, полученного авторами в настоящей работе. На эпицентральных расстояниях 110–240 км расчетные и наблюдаемые значения по вариантам 2 и 3 практически совпадают с наблюдаемыми. При этом за пределами 250 км для варианта 2 наблюдается незначительное занижение расчетных значений интенсивности.

При использовании в расчетах параметров очага в соответствии с Дагестанским каталогом [21] наилучшая сходимость расчетных и наблюдаемых интенсивностей ΔI в диапазоне 0.2–0.3 балла получена для уравнения (3) (см. рис. 10б).

На рис. 11 приводится сравнение расчетных и наблюдаемых интенсивностей при использовании параметров макросейсмического очага, определенного по изосейсте 6 баллов. Расчетные значения интенсивности для коэффициентов макросейсмического поля по уравнениям (3) и (2) при ориентации поля вдоль разломов по-прежнему дают лучшую сходимость. Сходимость увеличивается за счет учета погрешностей в определении коэффициентов в (3), и ΔI составляет 0.1–0.2 балла (см. вариант 14, табл. 2).

Анализ результатов показывает, что полученные авторами в настоящей работе коэффициенты макросейсмического поля (1) и устойчивые параметры в уравнении (5) [33], а также уравнение (2) дают близкие оценки расчетной интенсивности, что позволяет уточнить границы зоны с квазистабильными параметрами поля на Восточном Кавказе [33] за счет ее расширения (см. рис. 9). Уточнение границ зоны с квазистабильными параметрами макросейсмического поля хорошо

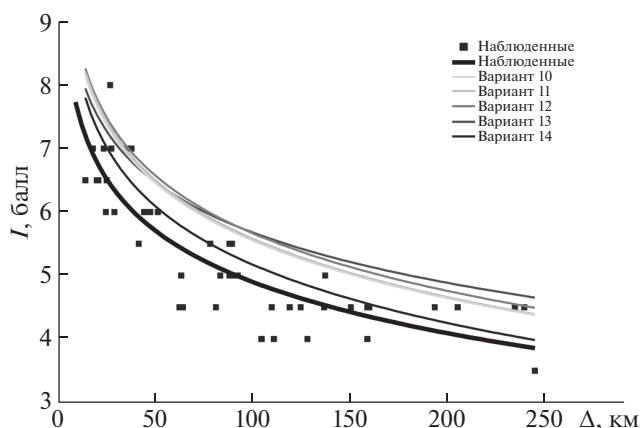


Рис. 11. Сравнение расчетной и наблюдаемой интенсивностей, варианты 10–14 (см. табл. 2).

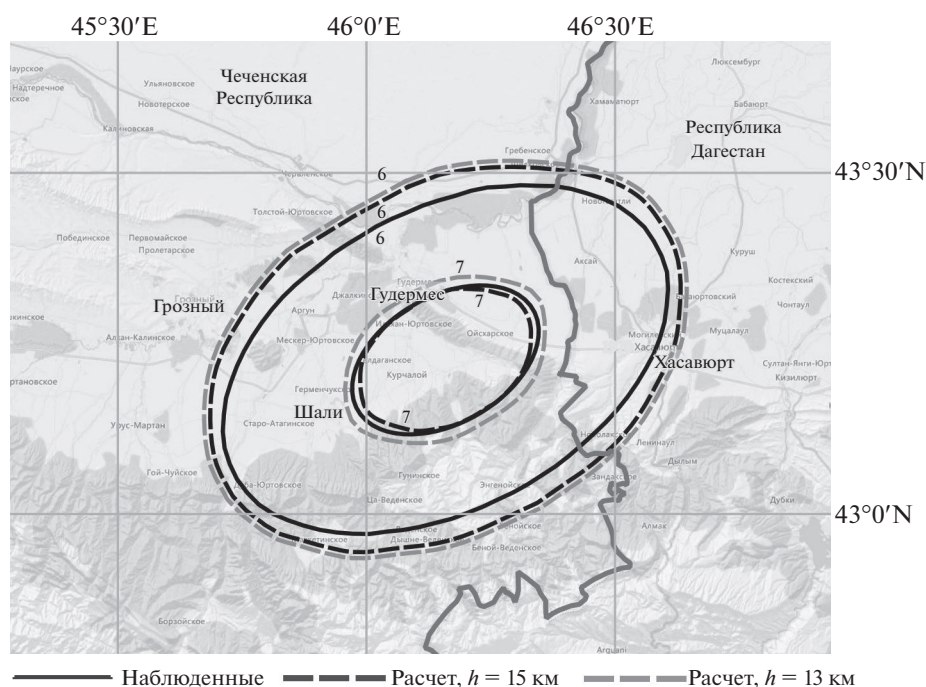


Рис. 12. Сравнение расчетных и наблюдаемых изосейст землетрясения 11.10.2008 г.

согласуется с границами зон ВОЗ [15, 16, 26] и результатами И.В. Ананьина по выделению сейсмогенных зон на Кавказе по коэффициентам затухания (см. рис. 3) [2].

В целом можно отметить, что откалиброванные коэффициенты уравнения макросейсмического поля для восточной зоны Северного Кавказа и коэффициенты, предложенные Н.В. Шебалиным для Дагестана, а также полученные в настоящем исследовании новые коэффициенты для южной территории ЧР (см. табл. 2, варианты 2, 3, 8, 14), могут успешно применяться для оперативной оценки последствий землетрясений на территории ЧР и Республики Дагестан (см. рис. 9).

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВОСТОЧНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Эффективность использования откалиброванных параметров поля может быть продемонстрирована сравнением расчетных и наблюда-

емых изосейст 6 и 7 баллов на примере Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г. с $M_s = 5.6$ (рис. 12). Наблюдаемое поле областей, околонурированных 6- и 7-балльными изосейстами, имеет более сложную конфигурацию, чем расчетное, однако населенные пункты с наибольшей численностью населения в том и другом случае находятся в зонах одинаковой балльности.

Погрешности в определении расчетных интенсивностей с помощью системы “Экстремум” для Курчалойского землетрясения, вычисленные как процентное отношение разности площадей к общей площади участков, ограниченных изосейстами 6 и 7 баллов при разных глубинах очага $h = 13$ и $h = 15$ км, варьируют от 9 до 29% [13].

Анализ табл. 3 и полученные оценки погрешностей в определении интенсивности показывают достаточно хорошую сходимость наблюдаемого эффекта и результатов моделирования последствий землетрясения. Что позволяет сделать вывод об эффективности калибровки моделей макросейсмического поля системы “Экстремум”. Это дает уверенность в получении своевременной

Таблица 3. Площади расчетных и наблюдаемых изосейст 6 и 7 баллов

	I , балл	Площадь, км ²	ΔS , %	I , балл	Площадь, км ²	ΔS , %
$\varphi = 43.20^\circ$; $\lambda = 46.14^\circ$; $M_s = 5.6$; $h = 13$ км	7	677.9	26.6	6	3843.7	28.6
$\varphi = 43.20^\circ$; $\lambda = 46.14^\circ$; $M_s = 5.6$; $h = 15$ км		488.0	8.9		3620.7	21.1
Наблюдаемые		535.4			2989.9	

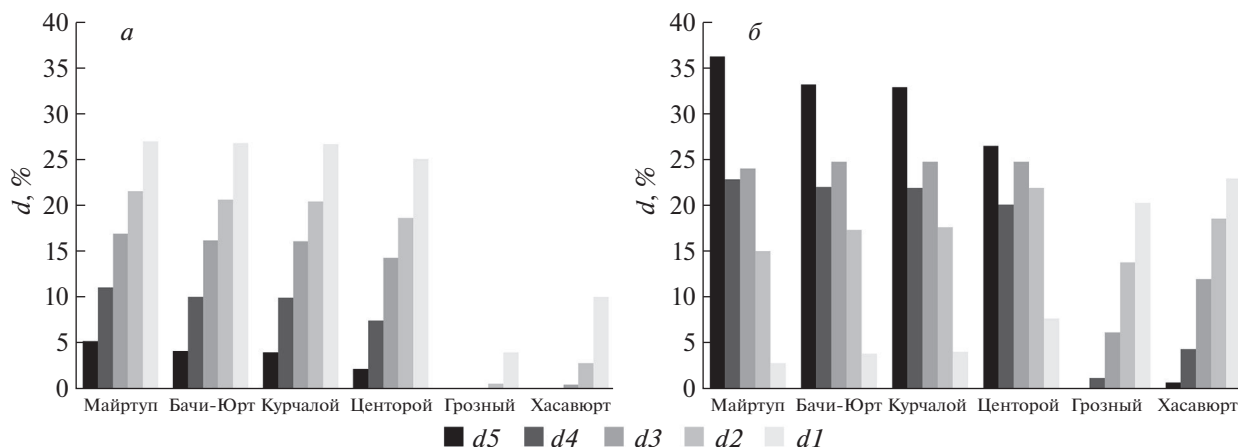


Рис. 13. Распределение степеней повреждений застройки в случае землетрясения с $M_s = 5.6$, $h = 13$ км (а) и $M_s = 6.3$, $h = 13$ км (б).

правильной оперативной оценки последствий, что сократит время принятия решения о реагировании и оказании помощи, а в случае заблаговременных оценок потерь от возможных опасных событий подготовить план превентивных мероприятий для минимизации негативных последствий.

С учетом уточненных оценок Е.А. Рогожина [25] о M_{\max} для зоны, где произошло Курчалойское землетрясение (11 октября 2008 г.), возможны события с магнитудой $M_s = 6.3$, соответствующей максимальной магнитуде в рассматриваемой зоне ВОЗ. Сравнительные расчеты последствий, выполненные с помощью системы “Экстремум” для землетрясений с координатами Курчалойского землетрясения и магнитудами $M_s = 5.6$ и $M_s = 6.3$, показывают увеличение числа населенных пунктов с сильными повреждениями и обрушениями в случае возможного события с $M_s = 6.3$. Большое количество населенных пунктов может получить тяжелую среднюю степень повреждения застройки (d_4) и полное обрушение (d_5). В населенных пунктах Майртуп, Бачи Юрт, Курчалой, Центрой процент зданий, которые могут

быть полностью разрушены (d_5), увеличивается с 2 до 35% (рис. 13).

Эффективность использования откалиброванных квазистабильных параметров макросейсмического поля подтверждается и ретроспективными расчетами последствий с помощью системы “Экстремум” для Дагестанского землетрясения 14.05.1970 г. с $M_s = 6.6$. Площади расчетных изосейст достаточно хорошо согласуются с оценками наблюдаемого эффекта по публикациям [8, 9, 37] (табл. 4).

На рис. 14 приводится сравнение расчетных (для двух глубин очага 13 и 16 км) и наблюдаемых изосейст 7 и 8 баллов. Наблюдаемое поле областей, оконтуренных 7- и 8-балльными изосейстами, также имеет более сложную конфигурацию, чем расчетное, однако населенные пункты с наибольшей численностью населения, в том и другом случае находятся в зонах одинаковой балльности. Погрешности, вычисленные как процентное отношение разности площадей к общей площади участков, ограниченных изосейстами 7 и 8 баллов при разных глубинах очага 13 и 16 км, и наблюдаемыми, варьируют от 5 до 30%.

Таблица 4. Площади расчетных и наблюдаемых изосейст 8 и 7 баллов

Изосейста	Площадь, км ²
Наблюденная 8 балльная	1005
Расчетная 8 балльная при $h = 13$ км	1055
Расчетная 8 балльная при $h = 16$ км	830
Наблюденная 7 балльная	4000
Расчетная 7 балльная при $h = 13$ км	5200
Расчетная 7 балльная при $h = 16$ км	4700

Результаты ретроспективного моделирования возможных последствий на случай повторения землетрясения 14.05.1970 г. с параметрами очага по [37]: 43.0°N ; 47.09°E ; $M_s = 6.6$; $h = 13$ км и $h = 16$ км, приведены в табл. 5 и на рис. 15. Для наиболее крупных городов и населенных пунктов в эпицентральной области показано распределение вероятностей разных степеней повреждений в случае повторения события с разными глубинами очага.

В случае повторения Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. в ЧР расчетные показатели последствий зависят как от используемых коэффициентов уравнения макросейсмического поля,

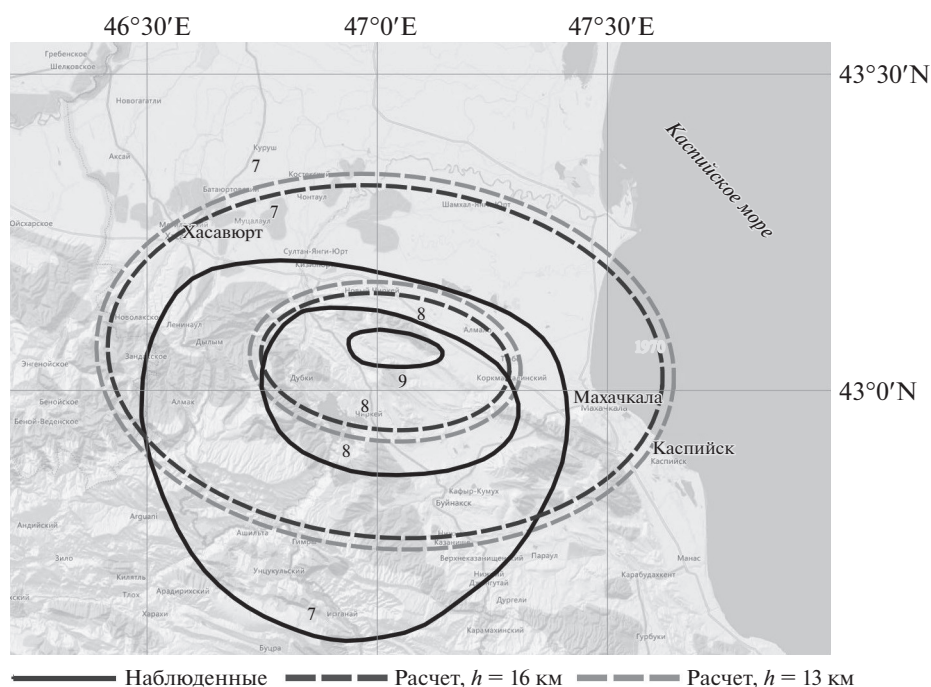


Рис. 14. Сравнение расчетных и наблюдаемых значений сейсмической интенсивности землетрясения 14.05.1970 г. в Республике Дагестан.

так и от параметров события. На рис. 16 приведены результаты последствий землетрясения с $M = 6.4$, рассчитанные с помощью системы “Экстремум” для разных глубин очага и координат эпицентра (см. варианты 7 и 14, табл. 2).

На рис. 17 приведено возможное распределение степеней повреждений застройки в наиболее пострадавших населенных пунктах в случае повторения Черногорского землетрясения 28 июля

1976 г. с $M_s = 6.4$ с разными глубинами очага и координатами эпицентра согласно вариантам 7 и 14 (см. табл. 2).

ДИСКУССИЯ

Основываясь на оценках M_{\max} по внерегиональному сейсмодинамическому методу и близости дизъюнктивного узла с $M_{\max} = 7.1$ к исследуе-

Таблица 5. Расчетная вероятность степеней повреждения застройки на случай повторения землетрясения 14.05.1970 г.

Город	Вероятность степеней повреждения при $h = 16$ и 13 км					$d_{\text{среднее}}$ $h = 16/13$ км
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	
Махачкала	0.251/0.249	0.216/0.221	0.173/0.181	0.098/0.109	0.034/0.043	1.7/1.9
Буйнакс	0.247/0.240	0.227/0.232	0.189/0.197	0.121/0.134	0.053/0.068	2.0/2.2
Чиркей	0.105/0.047	0.235/0.185	0.237/0.246	0.187/0.211	0.220/0.307	3.0/3.5
Каспийск	0.221/0.224	0.177/0.181	0.108/0.115	0.036/0.004	0.006/0.007	1.0/1.1
Кизилюрт	0.241/0.245	0.201/0.206	0.145/0.156	0.067/0.077	0.016/0.021	1.4/1.5
Хасавюрт	0.202/0.204	0.140/0.145	0.066/0.007	0.014/0.015	0/0	0.7/0.8
Новый Чиркей	0.268/0.262	0.218/0.229	0.171/0.180	0.114/0.125	0.056/0.072	2.0/2.1
Дылым	0.241/0.249	0.180/0.186	0.132/0.143	0.066/0.075	0.017/0.023	1.3/1.5
Сулак	0.173/0.175	0.121/0.124	0.056/0.006	0.012/0.013	0/0	0.6/0.7

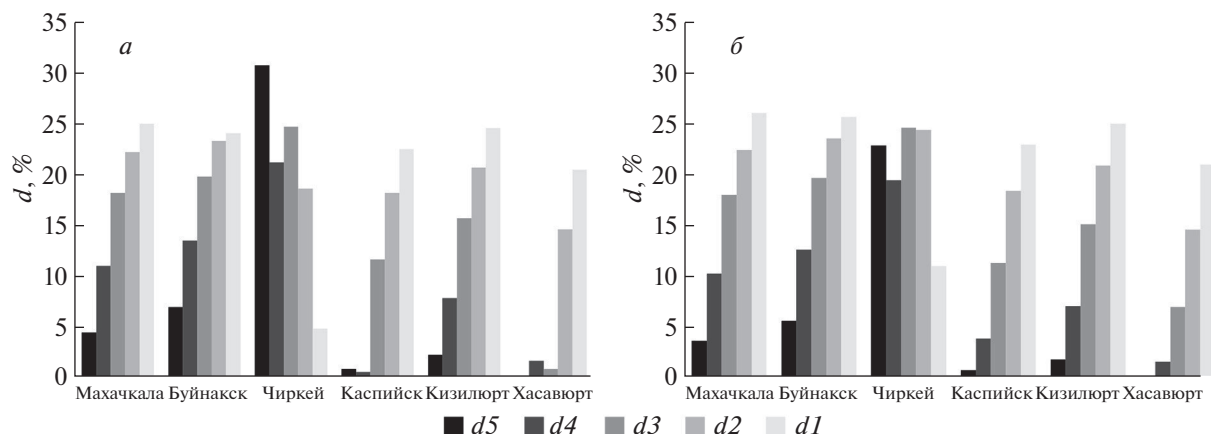


Рис. 15. Распределение степеней повреждений в случае повторения события 14.05.1970 г. с $h = 13$ км (а) и $h = 16$ км (б).

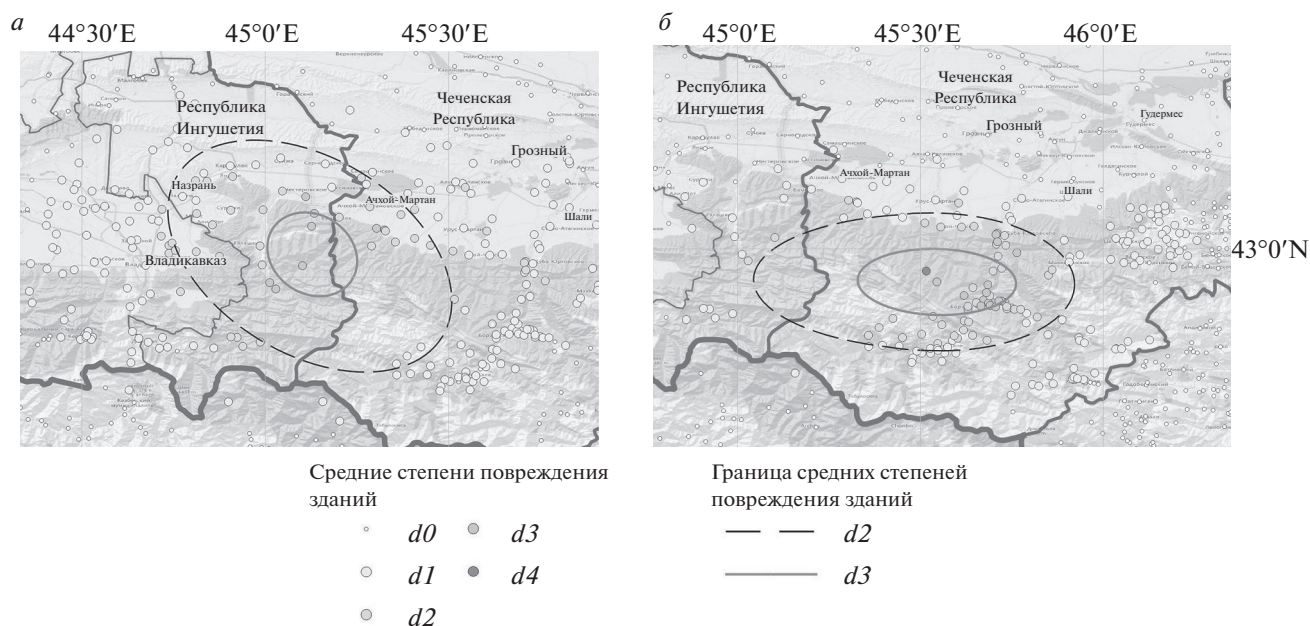


Рис. 16. Результаты моделирования последствий на случай повторения Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. в Чеченской Республике: а – $h = 25$ км (вариант 7, табл. 2); б – $h = 16$ км (вариант 14, табл. 2).

мой зоне Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. [39], а также на предположении, что характер реализации сейсмичности в последующие годы в близлежащем блоке не характеризовал предельно возможную магнитуду в очаге Черногорского землетрясения, как это было отмечено для Дагестанского землетрясения 14.05.1970 г. [4], проведем расчеты последствий при допущении, что такая магнитуда может реализоваться в этом дизъюнктивном узле. Заметим, что очаг может равновероятно иметь глубину 25 или 16 км. Задавая положение очага в двух вариантах: опубликованном в [21] и в виде макросейсмического

очага, полученного авторами по центру наиболее уверенно построенной 6-балльной изосейсты, получим следующие результаты (рис. 18, 19).

Негативный эффект от возможного события с $M = 7.1$ зависит как от глубины очага, так и от его местоположения, так как при расчетах макросейсмическое поле ориентируется вдоль ближайшего разлома. В случае реализации события с координатами по Дагестанскому каталогу и при глубине $h = 25$ км интенсивность в эпицентральной зоне может варьировать от 8 до 9 баллов (см. рис. 18а), в случае макросейсмического эпицентра по 6-й изосейсте и при глубине 16 км интен-

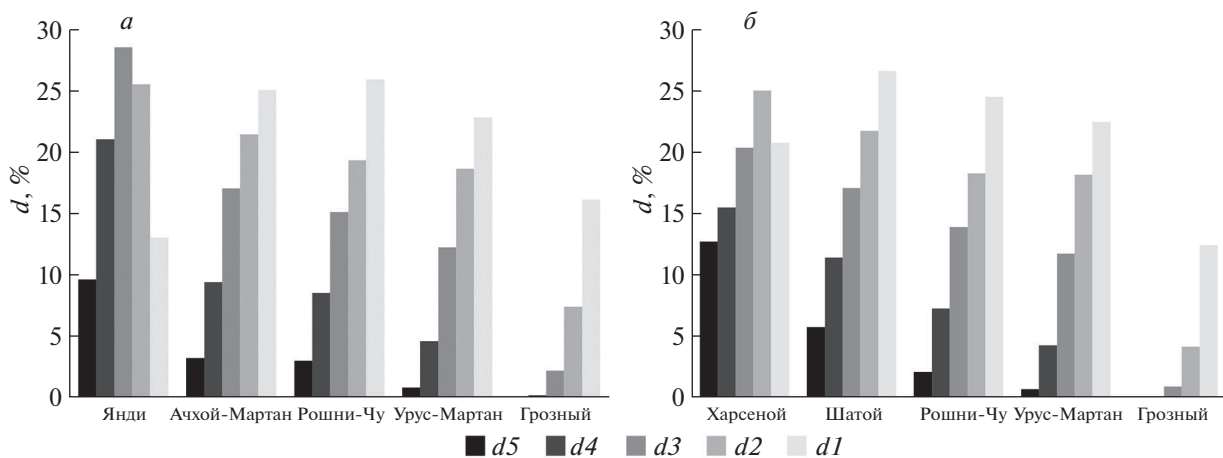


Рис. 17. Распределение степеней повреждений застройки в случае повторения Черногорского землетрясения 28.07.1976 г.: а – вариант 7, табл. 2; б – вариант 14, табл. 2.

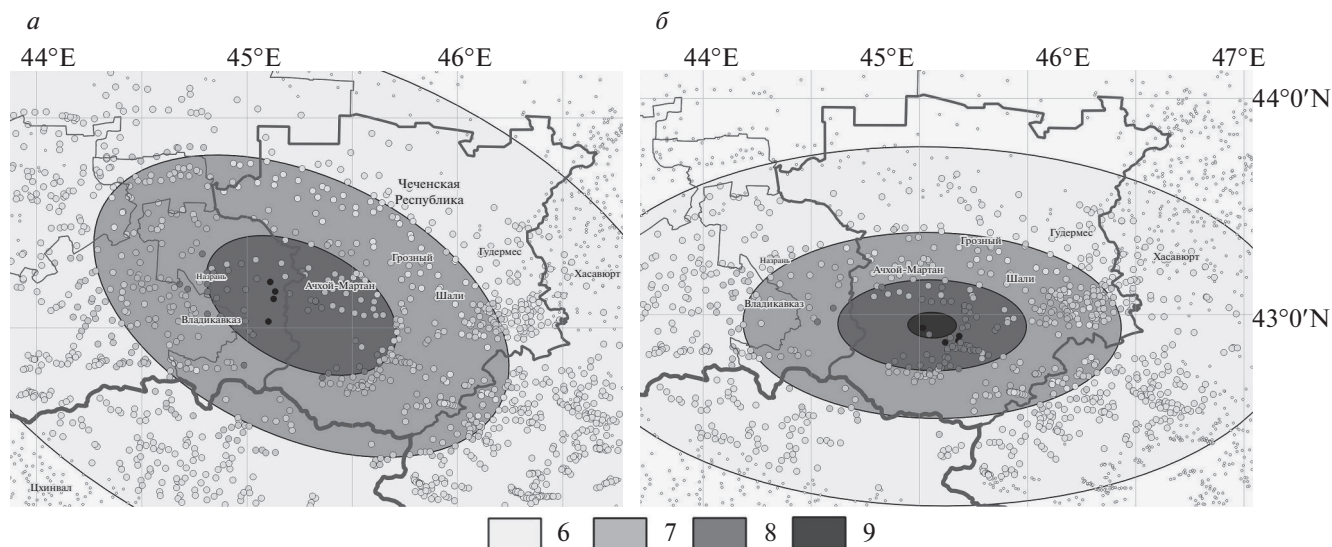


Рис. 18. Расчетные изосейсты сценарийных событий с магнитудой $M=7.1$: а – вариант 7а; б – вариант 14а (см. табл. 2).

сивность в эпицентральной зоне может превышать 9 баллов (см. рис. 18б).

Наиболее тяжелые повреждения ($d3$ и $d4$) вплоть до полного обрушения ($d5$) может получить застройка населенных пунктов Янди, Чожи-Чу, Бамут, Шалажи, Ачхой-Мартан в случае сценарийного землетрясения с координатами по варианту 7а и с $M=7.1$ (табл. 6). В случае события с координатами по варианту 14а и с той же магнитудой наибольшие повреждения возможны в населенных пунктах Харсеной, Ушкалой, Шатой, Янди (см. табл. 6).

Наглядное представление повреждений строений третьей степени в леспромхозе Чожи-Чу, где отмечались 8 (8–9) балльные сотрясения от Чер-

ногорского землетрясения 1976 г., дается в статье [14]. Отмечается, что в момент землетрясения “кирпичные дома в поселке были сравнительно новые, на хорошем фундаменте с кирпичным цоколем. Из наружных разрушений наиболее существенными были: отход на 5–6 см капитальной стены, сквозные трещины в несущей конструкции, вывал карниза с обеих сторон здания, развал труб и др. Внутри зданий отмечено обрушение кирпичных перегородок, развал печей, сквозные и несквозные трещины. В деревянных (каркасных) строениях отмечены такие повреждения: перекося каркаса здания и провал потолка, сквозные вертикальные трещины по центру здания вдоль сочленения конструкций, разрушение кирпичных печей, сдвигание их основания, провал печных труб. Характерная особенность проявления

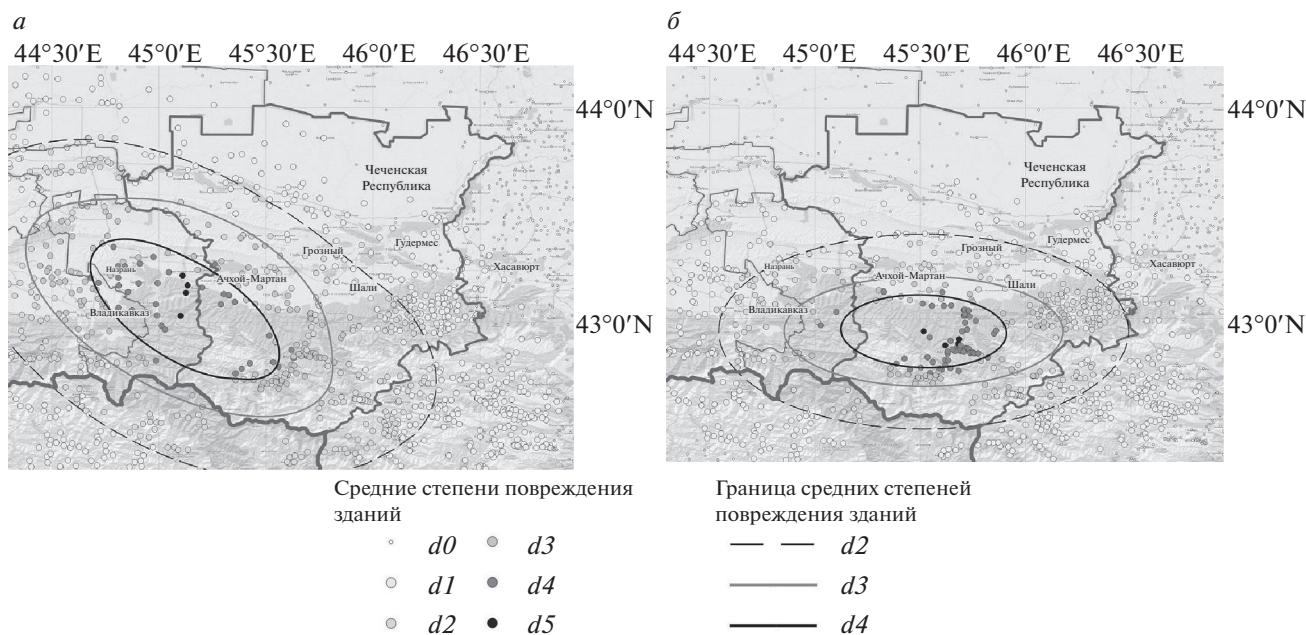


Рис. 19. Распределение ущерба от сценарийных событий магнитудой $M = 7.1$: а – вариант 7а; б – вариант 14а (см. табл. 2).

землетрясения в п. Чожи-Чу и других близлежащих населенных пунктах – повсеместное скручивание и изгиб телевизионных антенн с отрывом растяжек”.

Анализ результатов моделирования показывает, что при более сильном возможном событии в восточной зоне Северного Кавказа с $M = 7.1$ значительно ухудшается картина с разрушениями и

Таблица 6. Расчетная вероятность степеней повреждения застройки на случай сценарийного землетрясения с координатами Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. по вариантам 7а и 14а (см. табл. 2) с $M = 7.1$

Город	Вероятность степеней повреждения при сценарийных событиях по вариантам 7а/14а с $M = 7.1$					$d_{\text{среднее}}$, вариант 7а/вариант 14а
	d1	d2	d3	d4	d4	
Янди	0.0/0.0	0.0/0.2	0.1/0.3	0.2/0.3	0.6/0.3	4.4/3.6
Чожи-Чу	0.0/0.2	0.1/0.3	0.2/0.2	0.2/0.2	0.4/0.2	3.8/2.9
Бамут	0.0/0.2	0.1/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	0.4/0.1	3.8/2.1
Шалажи	0.0/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.3/0.2	3.7/3.0
Ачхой-Мартан	0.1/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	0.3/0.1	3.6/2.1
Рошни-Чу	0.1/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.3/0.3	3.4/3.3
Ушкалой	0.1/0	0.2/0.1	0.3/0.2	0.3/0.3	0.2/0.4	3.4/3.9
Орджоникидзевская	0.1/0.3	0.2/0.2	0.3/0.1	0.3/0.0	0.2/0.0	3.2/1.2
Харсеной	0.1/0.0	0.2/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.5	3.1/4.2
Урус-Мартан	0.1/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	3.0/3.0
Гехи	0.1/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	3.0/2.5
Владикавказ	0.1/0.3	0.3/0.3	0.3/0.2	0.2/0.1	0.1/0.0	2.8/1.8
Назрань	0.1/0.3	0.2/0.2	0.3/0.1	0.2/0.0	0.1/0.0	2.8/1.1
Шатой	0.2/0.0	0.3/0.1	0.2/0.2	0.2/0.2	0.1/0.4	2.5/3.8
Грозный	0.3/0.2	0.2/0.2	0.2/0.1	0.1/0.1	0.0/0.0	1.7/1.3



Рис. 20. Средние степени повреждения зданий для наиболее крупных городов региона в случае сценарийных событий по вариантам 7, 14 с $M = 6.4$ и 7а, 14а с $M = 7.1$ (см. табл. 2).

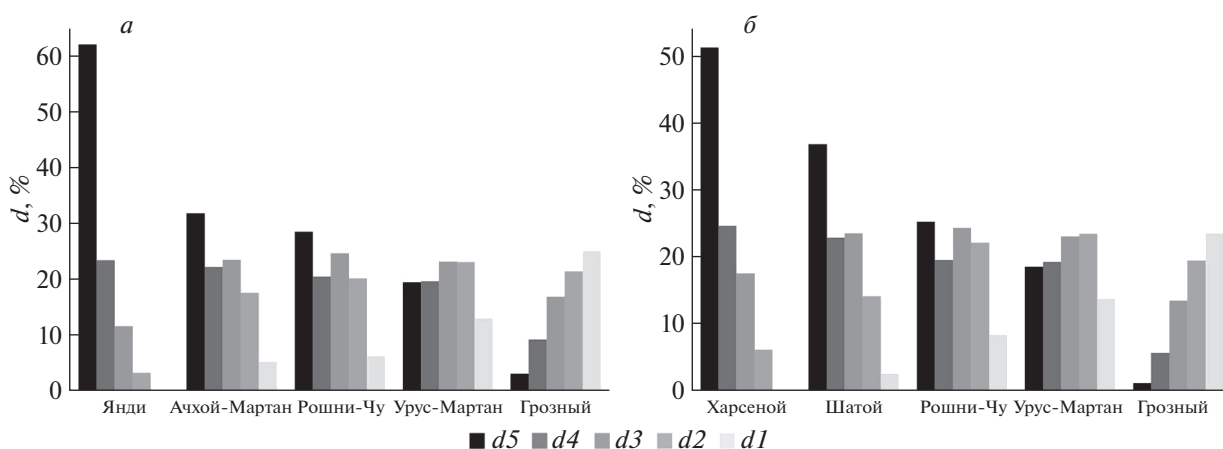


Рис. 21. Распределение степеней повреждений застройки в случае сценарийного события с $M = 7.1$ и координатами Черногорского землетрясения 28.07.1976 г.: а – вариант 7а, б – вариант 14а (см. табл. 2).

повреждениями (см. рис. 19) по сравнению с событием с $M = 6.4$ (см. рис. 16). Во время события с $M = 7.1$ и координатами по варианту 7а (см. табл. 2) в среднем застройка в крупных городах Владикавказ, Назрань, Орджоникидзевская, Урус-Мартан может получить тяжелые повреждения $d3$ (рис. 20).

При этом в отдельных населенных пунктах в ближней зоне возможного землетрясения с $M = 7.1$ до 50% застройки могут быть полностью разрушены (рис. 21).

ВЫВОДЫ

В статье подтверждены целесообразность и эффективность калибровки моделей системы “Экстремум” для оперативной и заблаговременной оценки потерь от землетрясений.

Проведенные дополнительные исследования сеймотектонической обстановки рассматриваемого региона и анализ наблюдаемых и расчетных

значений сейсмической интенсивности, полученных с помощью системы “Экстремум”, позволили расширить границы выделенной в 2019 г. зоны с квазистабильными параметрами макросейсмического поля в восточной зоне Северного Кавказа. При исследовании производилось сравнение наборов основных параметров землетрясений и параметров макросейсмического поля, полученных различными центрами и авторами ранее, производились учет направленности излучения и выбор действующего сейсмогенного разлома земной коры.

Приведены примеры успешного использования результатов калибровки макросейсмического поля для восточной зоны Северного Кавказа. Даны описание ретроспективной оценки последствий Дагестанского землетрясения 14.05.1970 г., Черногорского землетрясения 28.07.1976 г. и Курчалойского землетрясения 11.10.2008 г., а также прогноз последствий в случае более сильных событий в этих эпицентральных зонах.

Погрешности моделирования сейсмической интенсивности, оцененные как отношение площадей, ограниченных расчетными и наблюдаемыми изосейстами одинаковой балльности, не превышают 30%. Этот показатель является приемлемой характеристикой погрешности, обеспечивающей качественную работу при оперативном планировании спасательных операций и планировании превентивных мероприятий на случай сильного события.

Полученные результаты калибровки дополнили Базу данных, используемую для эффективной оперативной оценки последствий землетрясений, и будут применяться системой “Экстремум” при возникновении разрушительных землетрясений в районе востока Северного Кавказа, включающего территории Чеченской Республики и Республики Дагестан.

БЛАГОДАРНОСТИ

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 № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”, государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № 075-01471-22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абелев Е.Г., Антонов В.В., Габсатарова И.П., Захарова А.И., и др.* Землетрясение 4 марта на Северном Кавказе // Землетрясения в СССР в 1984 году. М.: Наука, 1987. С. 35–44.
2. *Ананьин И.В.* Аргунское землетрясение 2 марта 1966 г. // Землетрясения в СССР в 1966 году. М.: Наука, 1970. С. 35–43.
3. *Ананьин И.В.* Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 149 с.
4. *Асманов О.А., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Алисултанова Г.С.* Каталог афтершоков Черногорского землетрясения 28 июля 1976 года в Чечено-Ингушетии // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана / Отв. ред. Г.И. Дейнега. Махачкала: Даг. фил. АН СССР, Ин-т геологии, 1979. № 3 (21). С. 56–62.
5. *Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. С. 47, 49, 349.
6. *Богачкин Б.М., Габсатарова И.П., Захарова А.И., Лякумович Б.Я., и др.* Землетрясение 3 августа 1989 года на Северном Кавказе // Землетрясения в СССР в 1989 году. М.: Наука, 1993. С. 32–44.
7. *Борисов Б.А., Рейснер Г.И.* О геологической обстановке Чечено-Ингушского землетрясения 1976 г. // Бюл. МОИП. Отд. Геол, 1977. (4), 78.
8. *Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.* Сейсмология, геология, геофизика. М.: Наука, 1980. 220 с.
9. *Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.* Разрушительные последствия, инженерная сейсмология, вопросы сейсмостойкого строительства. М.: Наука, 1981. 256 с.
10. *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. IJPE RAS, 1996.
11. *Ларионов В.И., Суцев С.П., Угаров А.Н., Фролова Н.И.* Оценка сейсмического риска с применением ГИС-технологий. // Природные опасности России. Т. 6: Оценка и управление природными рисками / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. Фирма “КРУК”, 2003. С. 209–231.
12. *Ларионов В.И., Фролова Н.И.* Общая методология оценки рисков // Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология: в 3 т. Т. 1: Аварийный риск. Взрывные и ударные воздействия / [Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.]. М.: Наука, 2005. С. 2–34.
13. *Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Габсатарова И.П. и др.* Повышение надежности оперативных оценок потерь от землетрясений на территории Чеченской Республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Т. X. Часть 2 / Науч. ред. А.О. Глико, И.А. Керимов. М.: ИИЕТ РАН, 2020. С. 145–155.
14. *Левкович Р.А., Крамынин П.И., Дейнега А.Г., Арефьев С.С.* Некоторые результаты эпицентральных наблюдений Черногорского землетрясения 28 июля 1976 года // Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана / Отв. ред. Г.И. Дейнега. Махачкала: Даг. фил. АН СССР, Ин-т геологии, 1979. № 3 (21). С. 63–86.
15. *Несмеянов С.А., Лутиков А.И., Аверьянова В.Н., Габсатарова И.П. и др.* Макросейсмическое поле, основные зоны ВОЗ и сейсмическая сотрясаемость // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. М.: Минстрой России, 1996. С. 48–56.
16. *Несмеянов С.А., Воейкова О.А., Никитин М.Ю., Рогожин Е.А., Серебрякова Л.И.* Тектонические условия региона г. Грозного // Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного. М.: Минстрой России, 1996. С. 5–22.
17. *Никонов А.А.* Сильнейшие землетрясения Восточного Кавказа с точки зрения геодинамики // Геодинамика Кавказа: сб. науч. тр. / Отв. ред. АА Белов, М.А. Сатиан. М.: Наука, 1989. С. 148–156.

18. *Никонов А.А.* Определение диспозиции и масштабно-ности очаговых разломов сильнейших землетрясений Восточного Кавказа с VIII в.н.э. по характеристикам высшей изосейсты макросейсмического поля // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тез. докл. Врос. сов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. С. 199–200.
19. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 506 с.
20. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2016. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
21. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Макросейсмические и инструментальные данные о землетрясениях за период с VII в.н.э. до 2005 года. Махачкала: Эпоха, 2007. 394 с.
22. *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.
23. *Рейснер Г.И., Иогансон Л.И., Рейснер М.Г., Баранов Ю.Е.* Типизация земной коры и современные геологические процессы. М.: ИФЗ РАН, 1993. 208 с.
24. *Рогожин Е.А.* Современная геодинамика и потенциальные очаги землетрясений Кавказского региона // Современные математические и геологические модели природной среды. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 244–254.
25. *Рогожин Е.А., Лутиков А.И., Овсяченко А.Н.* Оценка сейсмической опасности Северного Кавказа в детальном масштабе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 5. С. 14–19.
26. *Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собищев А.Л., и др.* Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
27. *Смирнова М.И., Рустанович Д.Н., Санаев О.А.* Ачхой-Мартановское землетрясение 17 (18) июня 1969 г. // Землетрясения СССР в 1969 году. М. Наука, 1973. С. 29–32.
28. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Отв. ред. В.И. Уломов, URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>.
29. *Уломов В.И., Шумилиа Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
30. *Уломов В.И., Богданов М.И., Пустовитенко Б.Г., Перетокин С.А. и др.* Анализ сейсмической опасности Крыма и Северного Кавказа и адаптация полученных оценок к комплекту карт ОСР-2014 // Инженерные изыскания. 2015. № 13. С. 12–27.
31. *Фролова Н.И., Угаров А.Н.* База знаний о сильных землетрясениях как инструмент повышения надежности оперативных оценок потерь // Геоэкология. 2018. № 6. С. 1–18. <https://doi.org/10.1134/S0869780318060017>
32. *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 // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: матер. XIII Междунар. сейсмол. школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 292–297.
33. *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. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37>
34. *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>
35. *Фролова Н.И., Габсатарова И.П., Суцев С.П., Угаров А.Н., Малаева Н.С.* Калибровка модели затухания сейсмической интенсивности на Балканах (землетрясения в Хорватии 2020 г.) // Геоэкология. 2021. № 5. С. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S0869780921050040>
36. *Шебалин Н.В.* Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–121.
37. *Шебалин Н.В., Крестников В.Н., Рустанович Д.Н., Штейнберг В.В., и др.* Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. // Землетрясения в СССР в 1970 году. М: Наука, 1974. С. 28–49.
38. *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.
39. *Шолто В.Н., Рейснер Г.И., Рогожин Е.А.* Идеи академика Гамбурцева в сеймотектонике // Физика Земли. 2004. № 5. С. 68–79.
40. Global CMT Catalog <https://www.globalcmt.org>

CALIBRATING THE “EXTREMUM” SYSTEM MODEL FOR EARTHQUAKE LOSS ASSESSMENT IN THE EASTERN ZONE OF THE NORTHERN CAUCASUS

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

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

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

^c *Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia*

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

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

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

This research is aimed at the calibration of the “Extremum” system models used to simulate possible loss due to strong earthquakes. The parameters of the macroseismic field in the eastern zone of the Northern Caucasus are investigated based on the data set of earthquakes which have occurred there since the early 20th century. The study area is located around the northern structures of the Greater Caucasus and the Terek-Caspian trough. It is an area of high seismicity, part of the Chechen Republic and the Republic of Dagestan. It is known to have produced earthquakes of $M = 6.2-6.4$ in 1976 and of $M = 5.0-5.3$ in 1966, 1969 and 1984. The present study made it possible to expand the boundaries of the zone with “quasi-stable” parameters of the macroseismic field identified in 2019 in the eastern Caucasus. The zone mostly covered the source zone of the 1970 Dagestan earthquake and its immediate surroundings, and was afterwards extended to include the epicentral zone of the 2008 Kurchaloy earthquake. We compared the sets of basic earthquake parameters determined by different seismological agencies and coefficients of the macroseismic field equation obtained earlier by various authors, taking into account the direction of felt-effect propagation and the location of the active seismogenic faults in the crust. The observed values of seismic intensity and those computed using the “Extremum” system were compared. The calibration results complemented many sets of calibration data used for effective near real time earthquake loss assessment. They are recommended to be used in the “Extremum” system for assessing the parameters of emergency situations in the zones affected by destructive earthquakes in the republics of the North Caucasus (Chechen and Dagestan).

Keywords: *near real time earthquake loss estimates, macroseismic-field model calibration, Vladikavkaz fault, earthquake source zones, quasi-stable parameters, the “Extremum” system*

REFERENCES

1. Abelev E.G., Antonov V.V., Gabsatarova I.P., Zakharova, A.I. et al. *Zemletryasenie 4 marta na Severnom Kavkaze* [March 4 earthquake in the North Caucasus]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1984 godu* [Earthquakes in the USSR in 1984]. Moscow, Nauka Publ., 1987, pp. 35–44. (in Russian)
2. Anan'in I.V. *Argunskoe zemletryasenie 2 marta 1966 g.* [Argun earthquake on March 2, 1966]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1966 godu* [Earthquakes in the USSR in 1966]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 35–43. (in Russian)
3. Anan'in I.V. *Seismichnost' Severnogo Kavkaza* [Seismicity of the Northern Caucasus]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 149 p. (in Russian)
4. Asmanov O.A., Gamidova A.M., Musalaeva Z.A., Alisultanova G.S. *Katalog aftershokov Chernogorskogo zemletryaseniya 28 iyulya 1976 goda v Checheno-Ingushetii* [Catalog of aftershocks of the Chernogorsk earthquake on July 28, 1976 in Checheno-Ingushetia]. *Geodinamika i seismichnost' territorii Dagestana* [Geodynamics and seismicity of the territory of Dagestan]. G.I. Deinega, Ed., Makhachkala, Dag. FAN USSR, Institute of Geology Publ., 1979, no. 3 (21), pp. 56–62. (in Russian)
5. Aref'ev S.S. *Epitsentral'nye seismologicheskie issledovaniya*. [Epicentral seismological studies]. Moscow, ICC “Akademkniga” Publ., 2003, pp. 47, 49, 349. (in Russian)
6. Bogachkin B.M., Gabsatarova I.P., Zakharova A.I., Lyakumovich B.Ya. et al. *Zemletryasenie 3 avgusta 1989 goda na Severnom Kavkaze*. [Earthquake on August 3, 1989 in the North Caucasus]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1989 godu* [Earthquakes in the USSR in 1989]. Moscow, Nauka Publ., 1993, pp. 32–44. (in Russian)
7. Borisov B.A., Reisner G.I. On the geological setting of the Chechen-Ingush earthquake of 1976. *Bul. MOIP, otd. Geol.*, 1977, no. 4, p. 78. (in Russian)
8. *Dagestanskoe zemletryasenie 14 maya 1970 g. Seismologiya, geologiya, geofizika* [Dagestan earthquake on May 14, 1970. Seismology, Geology, Geophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 220 p. (in Russian)
9. *Dagestanskoe zemletryasenie 14 maya 1970 g. Razrushitel'nye posledstviya, inzhenernaya seismologiya, voprosy seismostoitel'nogo stroitel'stva* [Dagestan earthquake on May 14, 1970. Destructive consequences, engineering seismology. Question of Engineering Seismology]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 256 p. (in Russian)
10. Kondorskaya N.V., Gorbunova I.V., Kireev I.A., Vandyшева N.V. *Unifitsirovannyi katalog zemletryaseni Severnoi Evrazii s drevneishikh vremen do 1995 g.* [Unified catalog of earthquakes in Northern Eurasia from ancient times to 1995]. JIPE RAS Publ., 1996. (in Russian)

- sian) Available at: <http://www.scgis.ru> System of data bases.
11. Larionov V.I., Sushchev S.P., Ugarov A.N., Frolova N.I. *Otsenka seismicheskogo riska s primeneniem GIS-tehnologii* [Seismic risk assessment using GIS technologies]. *Prirodnye opasnosti Rossii. T. 6: Otsenka i upravlenie prirodnyimi riskami*. [Natural hazards in Russia. Vol. 6: Assessment and management of natural risks]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, "KRUK" Publ., 2003. pp. 209–231. (in Russian)
 12. Larionov V.I., Frolova N.I. *Obshchaya metodologiya otsenki riskov* [General methodology for risk assessment]. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. T. 1: Avariyniy risk. Vzryvnye i udarnye vozdeystviya* [Encyclopedia of safety: construction, industry, ecology: Vol. 1: Accident risk. Explosive and shock effects]. V.A. Kotlyarevsky, V.I. Larionov, S.P. Sushchev, Eds. Moscow, Nauka Publ., 2005. pp. 2–34. (in Russian)
 13. Larionov V.I., Frolova N.I., Ugarov A.N., Gabsatarova I.P. et al. *Povyshenie nadezhnosti operativnykh otsenok poter' ot zemletryaseniya na territorii Chechenskoi Respubliki*. [Increasing the reliability of near real time estimates of losses from earthquakes on the territory of the Chechen Republic]. *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza* [Modern problems of geology, geophysics and geocology of the North Caucasus. V.X. Part 2] A.O. Gliko, I.A. Kerimov, Eds. Moscow, IET RAN Publ., 2020, pp. 145–155. (in Russian)
 14. Levkovich R.A., Kramynin P.I., Deinega A.G., Arefiev S.S. *Nekotorye rezul'taty epitsentral'nykh nablyudenii Chernogorskogo zemletryaseniya 28 iyulya 1976 goda* [Some results of epicentral observations of the Chernogorskoe earthquake on July 28, 1976]. *Geodinamika i seismichnost' territorii Dagestana*. G.I. Deinega Ed. Makhachkala, Dag. FAN USSR, Institute of Geology Publ., 1979, no. 3 (21), pp. 63–86. (in Russian)
 15. Nesmeyanov S.A., Lutikov A.I., Averyanova V.N., Gabsatarova I.P. et al. *Makroseismicheskoe pole, osnovnye zony VOZ i seismicheskaya sotryasaemost'* [Macro-seismic field, main zones VOZ and seismic shaking]. *Kompleksnaya otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo* [Complex assessment of the seismic hazard of the territory of Grozny City]. Moscow, Minstroj Rossii, 1996, pp. 48–56. (in Russian)
 16. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A., Nikitin M.Yu., Rogozhin E.A., Serebryakova, L.I. *Tektonicheskie usloviya regiona g. Groznogo* [Tectonic conditions of the Grozny City region]. *Kompleksnaya otsenka seismicheskoi opasnosti territorii g. Groznogo* [Complex assessment of the seismic hazard of the territory of Grozny City]. Moscow, Minstroj of Russia, 1996, pp. 5–22. (in Russian)
 17. Nikonov A.A. *Sil'neishie zemletryaseniya Vostochnogo Kavkaza s tochki zreniya geodinamiki* [The strongest earthquakes of the Eastern Caucasus from the point of view of geodynamics]. *Geodinamika Kavkaza* [Geodynamics of the Caucasus]. A.A. Belov, M.A. Satian, Eds. Moscow, Nauka Publ., 1989, pp. 148–156. (in Russian)
 18. Nikonov A.A. *Opredelenie dispozitsii i masshtabnosti ochagovykh razlomov sil'neishikh zemletryaseniya Vostochnogo Kavkaza s VIII v n.e. po kharakteristikam vysshei izoseisty makroseismicheskogo polya* [Determination of the disposition and scale of focal faults of the strongest earthquakes in the Eastern Caucasus since the 8th century AD according to the characteristics of the higher isoseism of the macroseismic field]. *Vros. sov. Irkutsk "Razlomoobrazovanie v litosfere i soputstvuyushchie processy: tektonofizicheskii analiz"* [Proc. of All-Russian conf. Irkutsk "Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis"]. IGU Publ., 2021, pp. 199–200. (in Russian)
 19. *Novyi katalog sil'nyh zemletryaseniya na territorii SSSR s drevneishih vremen do 1975 g.* [New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from ancient times till 1975]. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin Eds. Moscow, Nauka Publ., 1977. 506 p. (in Russian)
 20. General seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2016. Explanatory note to the set of OSR-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones. *Inzhenernye izyskaniya*, 2016, no. 7, pp. 49–121. (in Russian)
 21. *Obshchii katalog zemletryaseniya na territorii Dagestana. Makroseismicheskie i instrumental'nye dannye o zemletryasenyah za period s VII v.n.e. do 2005 goda* [General catalog of earthquakes in the territory of Dagestan. Macro-seismic and instrumental data on earthquakes for the period from the 7th c. until 2005]. Makhachkala, Epokha Publ., 2007, 394 p. (in Russian)
 22. Petrova N.V., Dyagilev R.A., Gabsatarova I.P. *Osobennosti zatukhaniya seismicheskogo effekta zemletryaseniya Russkoi platform i Urala* [Peculiarities 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. (in Russian)
 23. Reisner G.I., Ioganson L.I., Reisner M.G., Baranov Yu.E. *Tipizatsiya zemnoi kory i sovremennye geologicheskie protsessy* [Typification of the Earth's crust and modern geological processes]. Moscow, IFZ RAN Publ., 1993, 208 pp. (in Russian)
 24. Rogozhin E.A. *Sovremennaya geodinamika i potencial'nye ochagi zemletryaseniya Kavkazskogo regiona* [Modern geodynamics and potential sources of earthquakes in the Caucasus region]. *Sovremennye matematicheskie i geologicheskie modeli prirodnoi sredy*. [Modern mathematical and geological models of the natural environment]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 2002, pp. 244–254. (in Russian)
 25. Rogozhin E.A., Lutikov A.I., Ovsyuchenko A.N. *Otsenka seismicheskoi opasnosti Severnogo Kavkaza v detal'nom masshtabe* [Assessment of the seismic hazard of the North Caucasus on a detailed scale]. *Seismostoi-koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2013, no. 5, pp. 14–19. (in Russian)
 26. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Lutikov A.I., Sobisevich A.L. et al. *Endogennye opasnosti Bol'shogo Kavkaza* [Endogenous hazards of the Greater Caucasus]. Moscow, IFZ RAN Publ., 2014, 256 p. (in Russian)
 27. Smirnova M.I., Rustanovich D.N., Sanaev O.A. *Achkhoi-Martanovskoe zemletryasenie 17 (18) iyunya 1969 g.* [Achkhoi-Martan earthquake on June 17 (18), 1969]. *Zemletryaseniya SSSR v 1969 godu* [Earthquakes of the USSR in 1969]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 29–32. (in Russian)
 28. *Spetsializirovannyi katalog zemletryaseniya dlya zadach obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossi-*

- iskoi Federatsii* [Specialized catalog of earthquakes for the tasks of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation]. V.I. Ulomov, Ed. (in Russian). Available at: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog.pdf>.
29. Ulomov V.I., Shumilina L.S. *Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossiiskoi Federatsii – OSR-97. Masshtab 1:8 000 000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh* [A set of maps of the general seismic zoning of the territory of the Russian Federation – OSR-97. Scale 1:8000000. Explanatory note and list of cities and towns located in earthquake-prone areas]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 1999, 57 p. (in Russian)
 30. Ulomov V.I., Bogdanov M.I., Pustovitenko B.G., Peretokin S.A. et al. *Analiz seismicheskoi opasnosti Kryma i Severnogo Kavkaza i adaptatsiya poluchennykh otsenok k komplektu kart OSR-2014* [Seismic hazard analysis of the Crimea and the North Caucasus and adaptation of the obtained estimates to the set of OSR-2014 maps]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, no. 13, pp. 12–27. (in Russian).
 31. Frolova N.I., Ugarov A.N. *Baza znaniy o sil'nykh zemletryasenyakh kak instrument povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter'* [Knowledge base about past earthquakes consequences as a tool to increase the reliability of near real time loss estimation]. *Geokologiya*, 2018, no. 6, pp. 1–18. DOI: 10.1134/S0869780318060017. (in Russian)
 32. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Ispol'zovanie makroseismicheskikh dannykh dlya povysheniya nadezhnosti operativnykh otsenok poter' na primere zemletryaseni stran SNG* [Using macroseismic data to improve the reliability of near real time loss estimates on the example of earthquakes in the CIS countries]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: mater. XIII Mezhdunar. seismol. shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Proc. XIII Intern. Seismol. Workshop]. A.A. Malovichko, Ed. Obninsk, FITs EGS RAN Publ., 2018, pp. 292–297. (in Russian)
 33. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Petrova N.V., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Vliyaniye osobennostey zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na nadezhnost' operativnykh otsenok poter' ot zemletryaseni* [Influence of shaking intensity attenuation peculiarities on reliability of earthquake loss estimation in emergency mode]. *Geokologiya*, 2019, no. 5, pp. 23–37. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019523-37> (in Russian)
 34. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Kalibrovka modeli zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na primere zemletryaseni v Albanii* [Calibration of the attenuation model of seismic intensity on the example of earthquakes in Albania]. *Geokologiya*, 2020, no. 5, pp. 62–77. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050033> (in Russian)
 35. Frolova N.I., Gabsatarova I.P., Sushchev S.P., Ugarov A.N., Malaeva N.S. *Kalibrovka modeli zatukhaniya seismicheskoi intensivnosti na Balkanakh (zemletryaseniya v Khorvatii 2020 g.)* [Calibration of seismic intensity attenuation model for the Balkan region (the 2020 earthquakes in Croatia)]. *Geokologiya*, 2021, no. 5, pp. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S0869780921050040> (in Russian)
 36. Shebalin N.V. *Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seismologicheskikh dannykh pri seismicheskoy raionirovani* [Methods of using engineering seismological data in seismic zoning]. *Seismicheskoye raionirovaniye SSSR* [Seismic zoning of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 95–121. (in Russian)
 37. Shebalin N.V., Krestnikov V.N., Rustanovich D.N., Shteinberg V.V. et al. *Dagestanskoye zemletryasenie 14 maya 1970 g.* [Dagestan earthquake on May 14, 1970]. *Zemletryaseniya v SSSR v 1970 godu* [Earthquakes in the USSR in 1970]. Moscow, Nauka Publ., 1974, pp. 28–49. (in Russian)
 38. Shebalin N.V. *Opornyye zemletryaseniya i uravneniya makroseismicheskogo polya* [Reference earthquakes and macroseismic field equations]. *Novyyi Katalog sil'nykh zemletryaseni na territorii SSSR (s drevneishikh vremen do 1975 g.)* [New Catalog of strong earthquakes in the USSR (from ancient times to 1975)]. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 20–30.
 39. Sholpo V.N., Reisner G.I., Rogozhin E.A. *Idei akademika Gamburtseva v seismotektonike* [Academician Gamburtsev's ideas in seismotectonics]. *Fizika Zemli*, 2004, no. 5, pp. 68–79. (in Russian)
 40. Global CMT Catalog. Available at: <https://www.globalcmt.org>.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.42:546.65 (571.56-25)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В АТМОСФЕРЕ ЯКУТСКА

© 2022 г. В. Н. Макаров^{1,*}¹ Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (ИМЗ СО РАН),
ул. Мерзлотная, д. 36, г. Якутск, 677010 Россия

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

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 08.04.2022 г.

В течение 2019–2020 гг. изучалось распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в приземной атмосфере г. Якутск. Исследовался химический состав взвешенных веществ (ВВ) в летней и зимней (снежный покров) атмосфере. Установлено, что в летний сезон РЗЭ в комплексе с группой сидерофильных элементов концентрируются в атмосфере преимущественно в пылевой фракции взвешенных веществ (ВВ). В зимний сезон ВВ более дисперсны. Средняя концентрация РЗЭ в “летних” ВВ $(n-n) \cdot 10$, в “зимних” ВВ $- n \cdot 10^{-1} - n$ мг/кг. В системе “почва → ВВ пыль → ВВ снег” наблюдается равномерное понижение концентрации РЗЭ и постепенное уменьшение отношения La/Y . Основная масса РЗЭ (~ 99%) выпадает из атмосферы в теплый период года. Объем атмосферного поступления РЗЭ на территорию города составляет в среднем около 625 мкг/м² сут, в основном за счет La, Ce, Nd и Y. На участках геохимических аномалий в северной промышленной части города эта величина возрастает в 2–3 раза. Суммарное выпадение РЗЭ на территорию города составляет около $1.2 \cdot 10^{-2}\%$ от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы.

Ключевые слова: атмосфера, взвешенные вещества, город, редкоземельные элементы, снежный покров**DOI:** 10.31857/S0869780922030055

ВВЕДЕНИЕ

Загрязняющие воздух взвешенные вещества (ВВ) – твердые частицы, атмосферные аэрозоли, непосредственно поступающие в воздух, и частицы, образующиеся в процессе превращения газов. Размер частиц в воздухе колеблется от 0.01 до 100 мкм. Установлена серьезная угроза здоровью людей при их воздействии [15]. Уровень загрязнения ВВ – один из важнейших показателей качества воздуха. Взвешенные вещества – недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов; показатель вредности – резорбтивное действие, класс опасности – 3¹.

Угрозу здоровью населения могут представлять и присутствующие в ВВ химические элементы различного класса токсичности. В последнее время установлено, что редкоземельные элементы (РЗЭ) оказывают токсическое действие на людей, и поэтому возникает необходимость изучения распространения этой группы элементов в окружающей среде и разработки нормативов их

содержания в природных средах и продуктах питания. Предполагается, что лантаноиды не так токсичны, как некоторые другие тяжелые металлы и металлоиды, но они могут оказывать хроническое воздействие на организм человека и приводить к долгосрочным неблагоприятным эффектам, особенно в регионах с высокими уровнями РЗЭ [5, 12]. В то же время известны антиоксидантные эффекты, связанные с РЗЭ, при лечении многих заболеваний [14].

Информации о РЗЭ все еще относительно недостаточно, что приводит к неоднозначным мнениям относительно их токсического воздействия и общего влияния на здоровье населения. Остается практически не изученным распространение РЗЭ в окружающей среде селитебных зон, особенно в северных районах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На территории г. Якутск было проведено геохимическое изучение ВВ, присутствующих в приземной атмосфере в летний и зимний (по снежному покрову) сезоны. Для исследования ВВ в летней атмосфере на территории города было установлено 10 пылесборников (рис. 1а). Сбор пыли происходил в период с 17 июля по 15 октяб-

¹ ГН 2.1.6.3492-17 предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (с изменениями на 31 мая 2018 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/556185926>

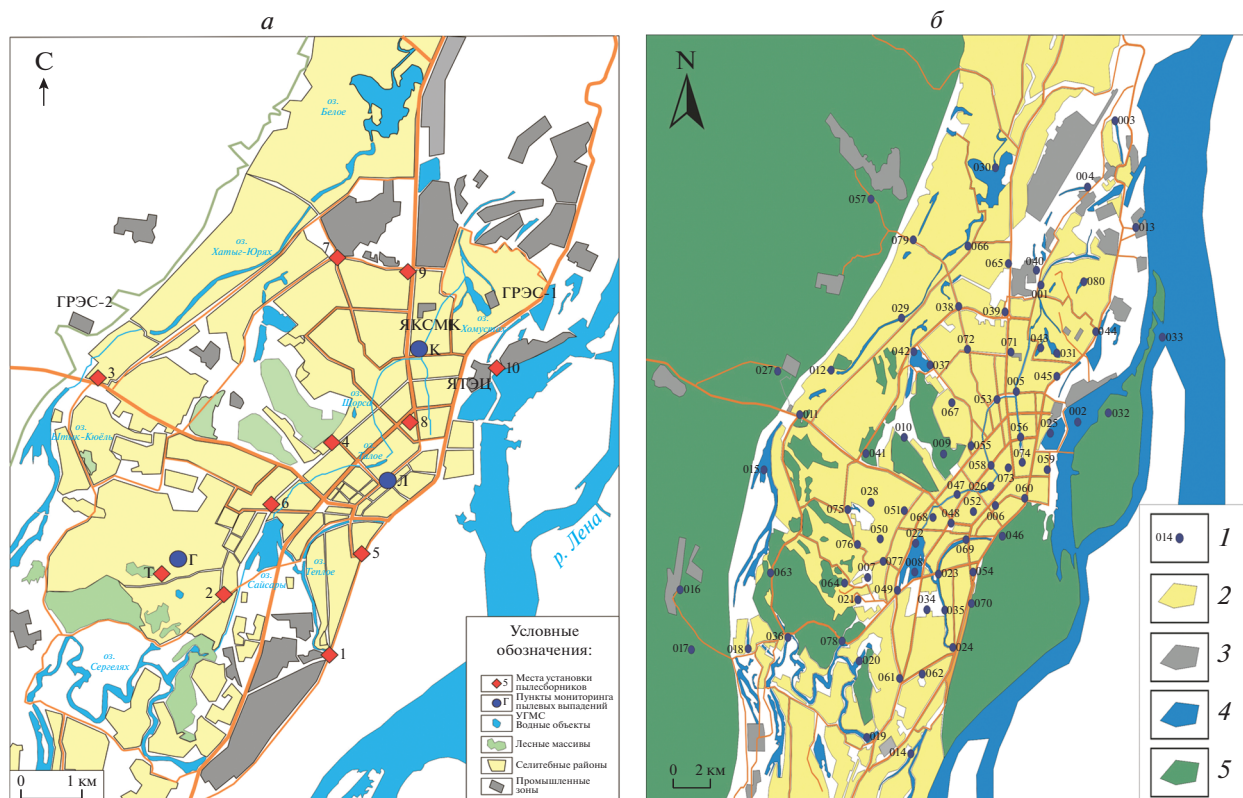


Рис. 1. Рис. 1. Схемы отбора проб: а – в летний период; б – в зимний период (1 – пункты отбора снега, 2 – жилые зоны, 3 – промышленные зоны, 4 – река, озера, 5 – леса, луга).

ря 2019 г. Использовались также данные круглогодичного аэрогеохимического мониторинга на стационаре Института мерзлотоведения СО РАН “Туймаада”. Для получения сведений о зимней атмосфере в марте 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега (см. рис. 1б).

Фоновый участок наблюдений находился в районе оз. Чабыда в 25 км к юго-западу от города за пределами зоны техногенного воздействия.



Рис. 2. Отбор пробы снега (фото Н.В. Торговкина).

Пробы снега отбирались в оптимальный период для изучения снежного покрова, непосредственно перед началом таяния, в течение нескольких дней во второй половине марта. На точке наблюдений снег отбирался на площадке 30 × 30 см. Минимальная удаленность от проезжей части составляла не менее 30 м, в большинстве случаев – более 200 м. Для отбора пробы использовали маркированный по 0.5 см стеклянный цилиндр диаметром 82 мм со стальным окаймлением, который опускали с поверхности снежного покрова на плоскую прямоугольную стальную лопатку на высоте 1.5 см от почвы либо у поверхности льда (рис. 2).

Пробу упаковывали в пластиковый пакет, взвешивали для расчета массы снега и определения его плотности. Пробы ежедневно поступали в лабораторию ИМЗ СО РАН, где снег плавился при комнатной температуре. После полного таяния пробу разделяли на твердую и жидкую фазы путем фильтрования через бумажные фильтры “синяя лента” с диаметром пор 1 мкм.

Аналитическая обработка геохимических проб проведена в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова, Е.С. Петрова, О.В. Шепелева) и Аналитическом сертификационном испытатель-

Таблица 1. Концентрация РЗЭ в геологических компонентах зоны гипергенеза [6, 8]

Компоненты зоны гипергенеза	Коэффициент концентрации относительно КЗК [2]			Кол-во проб
	0.7–1.0	1.0–1.5	>1.5	
Породы, $aQ_{III}^4 - Q_{IV}^1$: галечник, пески, супеси, глина, торф	La, Yb, Sc	Y	–	124
Почвы города: урбаноземы, экраноземы	Yb, La, Sc	Y	–	1769

Примечание. КЗК – кларк земной коры.

ном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН. Содержание РЗЭ определялось атомно-эмиссионным (iCAP-6500, Thermo Scientific, США) и масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методами анализа. Все анализы выполнены по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения и с необходимыми процедурами контроля.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Город Якутск располагается в среднем течении р. Лена в широкой долине Туймаада и протягивается вдоль левого берега реки на 20 км. Численность населения города 331 тыс. человек (01.01.2021 г.). Планировочная структура города радиально-кольцевая. Характер застройки неравномерный: на окраинах города – преимущественно одно- и двухэтажные деревянные строения, в центральной части – капитальная застройка каменными зданиями (от 4 до 16 этажей).

Якутск находится в зоне действия климата недостаточно влажного (индекс сухости от 1.0 до 2.0), умеренно теплого (в летний период), с суровой малоснежной зимой [4]. Среднегодовая температура воздуха за период непрерывных метеонаблюдений (1883–2020 гг.) варьирует в пределах $-7.2^{\circ}\text{C} \dots -12.1^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков – 235 мм.

В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, ежегодно поставляющих в атмосферу 11 700 т загрязняющих веществ². Стационарные источники преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе, и предприятия стройиндустрии. По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тыс. единиц автотранспорта, выбра-

² Государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 г.: <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (дата обращения: 15.02.2021).

сывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей.

Геологическое строение района определяется его положением в зоне сочленения двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория находится на стыке Вилюйской лито-сидерофильной области с кларковым уровнем накопления V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской халькофильной зоны с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au [3]. Характер кларкового концентрирования РЗЭ в компонентах зоны гипергенеза, которые являются источниками вещества привносимого в атмосферу, приведен в табл. 1.

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Редкоземельные элементы представляют собой группу из 15 элементов-лантаноидов: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, а также Sc и Y. По химическим они свойствам и совместному нахождению в природе делятся на подгруппы: иттриевую (Y, La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) и цериевую (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu). По атомной массе лантаноиды подразделяются на: легкие – La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, и тяжелые – Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

В мире наблюдается растущий интерес к распределению РЗЭ в окружающей среде, особенно в отношении токсического воздействия этих элементов.

Таблица 2. Фоновое содержание РЗЭ во ВВ в летней и зимней атмосфере, мг/кг

Элементы	Взвешенные вещества		Лето/Зима
	Летний период	Зимний период	
Sc	4.85	0.080	61
La	18.40	0.500	37
Ce	41.90	0.480	87
Pr	4.30	0.050	86
Nd	15.80	0.203	78
Sm	2.90	0.040	72
Eu	0.67	0.010	67
Gd	2.40	0.038	63
Tb	0.36	0.004	90
Dy	2.10	0.032	66
Ho	0.40	0.005	80
Er	1.20	0.015	80
Tm	0.16	0.001	160
Yb	1.10	0.015	73
Lu	0.16	0.002	80
Y	10.80	0.190	57
Сумма	107.50	1.665	65
%	99.3	0.7	—
La/Y	1.7	2.6	—

На территории Якутска проведено изучение распространения, концентрации и объема поступления РЗЭ на поверхность из летней и зимней приземной атмосферы.

Фоновое содержание РЗЭ во ВВ приземной атмосферы приведено в табл. 2.

Суммарное содержание РЗЭ во ВВ летней атмосферы, в окрестностях города за пределами техногенного воздействия — 107.50 мг/кг в 65 раз выше, чем в зимней — 1.66 мг/кг. Как в летних, так и зимних ВВ в атмосфере фонового района преобладают лантаноиды, роль которых максимальна в твердой фазе снежного покрова. Резкое преобладание РЗЭ в летней атмосферной пыли, близость и концентраций в ВВ, и в осадочных породах являются признаками интенсивного эолового поступления РЗЭ в атмосферу с поверхности земли и с интенсивными в июле—августе лесными пожарами. В зимнее время пылевое поступление в атмосферу за пределами городской территории практически отсутствует, что отражается в снижении концентрации РЗЭ во ВВ атмосферы почти на два порядка.

По данным анализа материала, собранного пылесборниками на территории города, ВВ в летней приземной атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. Дисперсный состав ВВ в

основном относится к собственно пыли: фракция PM_{10-100} — около 70% (PM — аббревиатура “particulate matter”, цифра показывает содержание всех частиц диаметром 10–100 мкм). Наблюдается преимущественное накопление РЗЭ в пылевых фракциях, в комплексе с группой сидерофильных элементов: Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Sr, Zr, Sn, W, поступающих в атмосферу в основном с минералами группы железа.

Минеральный состав основной массы летних ВВ (PM_{10-100}) в атмосфере города представлен в легкой фракции кварцем и карбонатами (по 36%) и полевым шпатом (24%); в тяжелой — преимущественно амфиболами (49%), эпидотом и пироксенами (10–11%), ильменитом и гранатами (около 7%).

Более дисперсная зимняя пыль (PM_{10}) представлена, в основном, карбонатами (около 70%), углеродными соединениями (15%), включениями кварца и полевого шпата (10%) и железистого растительного детрита (5%).

Во ВВ городской атмосферы формируются геохимические аномалии тяжелых металлов, редких, рассеянных, радиоактивных и редкоземельных элементов природного и техногенного происхождения. В табл. 3 представлены усредненные данные по концентрации РЗЭ в ВВ летней и зимней городской атмосфере Якутска.

Суммарное содержание РЗЭ в ВВ в городской атмосфере Якутска изменяется от 125.4 мг/кг в летней до 46.4 мг/кг в зимний период. Содержание РЗЭ в ВВ летней атмосфере города почти в 3 раза выше, чем в зимней. Соотношение концентрации РЗЭ в городской атмосфере резко изменяется по сравнению с фоновой территорией. Если в летней городской атмосфере концентрация РЗЭ превышает фоновые значения, примерно на 20%, то в зимний период происходит резкое почти 30-кратное повышение концентрации РЗЭ над фоном.

Как в летней, так и в зимней приземной атмосфере Якутска легкие РЗЭ во ВВ преобладают над тяжелыми, примерно в равном соотношении 4:1, что соответствует кларковому для земной коры [2]. Содержание РЗЭ во ВВ атмосферы аналогично средней концентрации РЗЭ в городских почвах. В большинстве случаев концентрирование РЗЭ в почвах связано с присутствием ряда таких минералов, как апатит (Y, РЗЭ замещают Ca) и циркон (Y, ТРЗЭ замещают Zr), суммарная концентрация которых в тяжелой фракции минерального состава почв равна 7%. Примерно такое же количество апатита и циркона содержится в тяжелой фракции летних ВВ (PM_{10-100}) в атмосфере города ~ 6%.

РЗЭ во ВВ летней и зимней атмосферы формируют обширные малококонтрастные ореолы, при-

Таблица 3. Среднее содержание РЗЭ во ВВ летней и зимней городской атмосфере, мг/кг

Элементы	Взвешенные вещества					
	Летний период			Зимний период		
	Город	Фон	Город/фон	Город	Фон	Город/фон
Sc	5.87	4.85	1.2	3.22	0.080	40.2
La	23.50	18.40	1.3	7.32	0.500	14.6
Ce	45.80	41.90	1.1	15.56	0.480	32.4
Pr	5.10	4.30	1.2	1.71	0.050	34.2
Nd	18.90	15.80	1.2	7.09	0.203	34.9
Sm	3.50	2.90	1.2	1.51	0.040	37.8
Eu	0.82	0.67	1.2	0.36	0.010	36.0
Gd	2.80	2.40	1.2	1.19	0.038	31.3
Tb	0.42	0.36	1.2	0.17	0.004	42.5
Dy	2.40	2.10	1.1	1.05	0.032	32.8
Ho	0.47	0.40	1.2	0.20	0.005	40.0
Er	1.37	1.20	1.1	0.57	0.015	38.0
Tm	0.19	0.16	1.2	0.08	0.001	80.0
Yb	1.32	1.10	1.2	0.54	0.015	36.0
Lu	0.19	0.16	1.2	0.08	0.002	40.0
Y	12.70	10.80	1.2	5.70	0.190	30.0
Сумма	125.4	107.50	1.2	46.4	1.665	27.4
Сумма (без Sc)	119.5	102.7	—	43.2	1.58	27.3
La/Y	1.85	1.70	—	1.28	2.6	—

Таблица 4. Среднее содержание РЗЭ в компонентах окружающей среды

Природная среда		La	Ce	Nd	Y	Источники
Атмосфера						
Якутск	Аэрозоли лето, нг/л					
	Аэрозоли зима (снег), мкг/л	0.121	0.222	100	—	
	ВВ зима (снег), мг/кг	7.3	15.6	7.1	—	
	ВВ лето, мг/кг	23.5	45.8	18.9	—	
Литосфера, мг/кг						
Литосфера		30	60	37	20	[2]
Пески, песчаники		17–100	25–80	16–48	15–200	[13]
Почвы подзолистые		5–21	44–56	19–26	7–30	
Почво-грунты, Якутск		16.6	≥15	—	22.8	Автор
Гидросфера, мкг/л						
Надмерзлотные воды		5.82	11.75	4.92	3.37	[7]

мерно равные по площади, преимущественно в северной промышленной части города (рис. 3).

Среднее содержание РЗЭ в компонентах атмосферы и литосферы по мировым данным и в районе Якутска представлено в табл. 4.

Наблюдается равномерное понижение концентрации РЗЭ в городской окружающей среде: почвы → ВВ летние → ВВ зимние.

Величина коэффициента аэрозольной аккумуляции показывает, что при формировании аэрозолей концентрация РЗЭ во ВВ понижается на один математический порядок по сравнению с аллювиальными почвами Центральной Якутии, и для РЗЭ характерна отрицательная интенсивность аэрозольного обогащения. Пониженная концентрация РЗЭ в континентальных аэрозолях

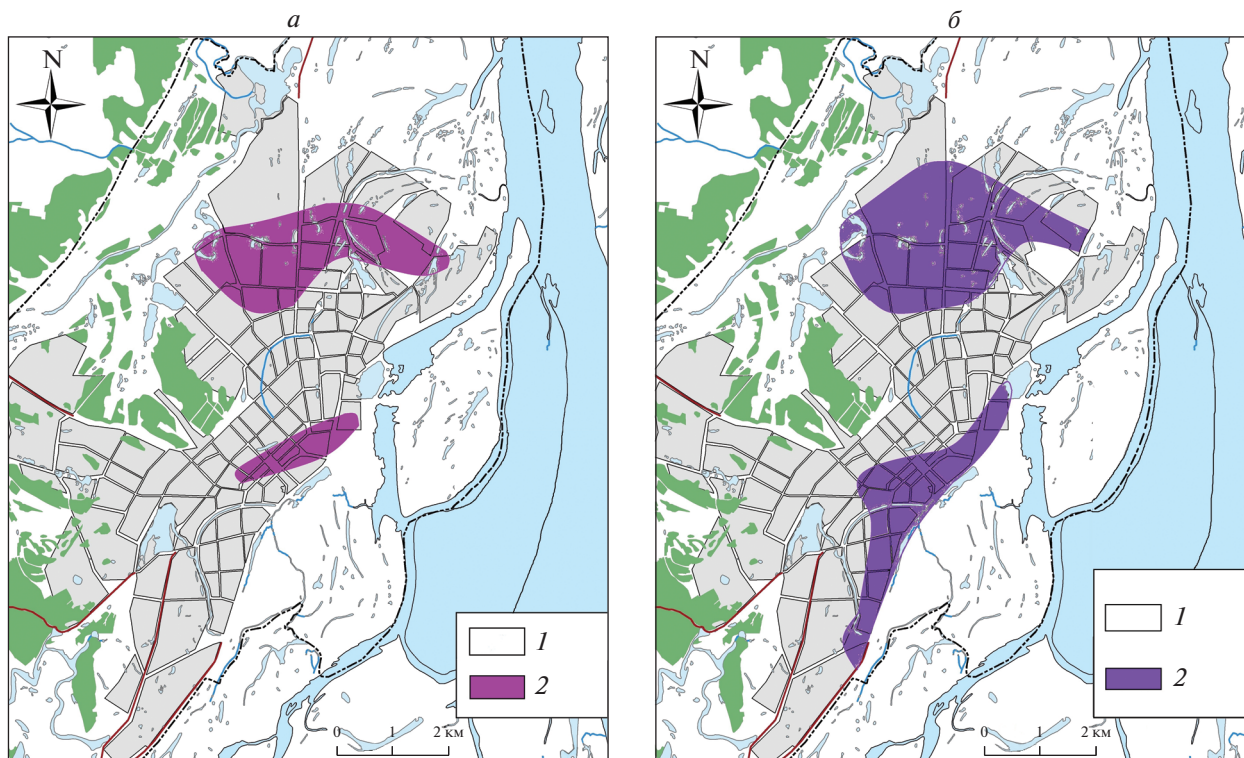


Рис. 3. Содержание РЗЭ (La, Ce, Y, Nb) в зимней атмосфере Якутска: *a* – растворимая фаза снежного покрова, содержание РЗЭ, нг/л: 1 – <500, 2 – >500; *б* – нерастворимая фаза снежного покрова, содержание РЗЭ, мг/кг: 1 – <40, 2 – >40.

района обусловлена составом исходного материала (преимущественно супесь и песок), поступающего в тропосферу в виде аэрозольных частиц.

Основная масса РЗЭ (~99%) выпадает из атмосферы в пылевой фазе в теплый период года. Ежедневное поступление РЗЭ из атмосферы в это время составляет в среднем $625 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$ (отношение $\text{La/Y} = 1.8$), с преобладанием в составе выпадений Ce, La и Nd (табл. 5).

На зимние твердые выпадения ВВ (преимущественно фракция PM_{10}) приходится всего около 1% от общей массы поступления РЗЭ из атмосферы на территорию города. Ежедневное суммарное поступление РЗЭ из атмосферы в холодный период на два порядка ниже, чем летом – $6.93 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$ (отношение $\text{La/Y} = 1.4$). Максимальный объем зимних атмосферных выпадений наблюдается для La и Ce около $1\text{--}2 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$ (см. табл. 5).

Основные объемы поступления РЗЭ из атмосферы (выше $>50 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$) определяются выпадением группы легких РЗЭ (Ce, La, Nd) и Y. Как в летних, так и в зимних ВВ преобладает поступление Ce. По уменьшению объема выпадений РЗЭ образуют следующий ряд: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Y}$.

В системе “породы–почвы” отношение La/Y практически идентично $0.73\text{--}0.84$. В летних и

зимних атмосферных ВВ отношение La/Y увеличивается почти в два раза, соответственно до $1.86\text{--}1.38$, за счет возрастания влияния цериевой группы. В связи с этим можно полагать, что в системе окружающей среды города: породы → почвы → атмосфера (ВВ), наблюдается некоторое улучшение экологической обстановки по РЗЭ, так как соединения подгруппы Ce (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm) менее токсичны, чем соединения подгруппы Y (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y) [7].

Суммарный объем атмосферного поступления РЗЭ на территорию города оценивается цифрой около $633 \text{ мкг/м}^2 \text{ год}$, основную массу которого составляют Ce, La, Nd и Y. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать в 2–3 раза, также за счет этой группы РЗЭ.

Суммарное выпадение РЗЭ составляет примерно $1.2 \cdot 10^{-2}\%$ от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы Якутска.

В почвы и грунты СТС слоя территории города большая часть РЗЭ поступает из атмосферы. Преимущественное поступление РЗЭ с пылевыми фракциями ВВ ограничивает их миграционную способность в основном поверхностью почв и сезонно-талыми грунтами культурного слоя до глу-

Таблица 5. Ежегодное поступление РЗЭ из атмосферы в течение года, мкг/м² сут

Элементы	Взвешенные вещества		
	Летний период	Зимний период	Годовая сумма выпадений
La	118	1.089	119
Ce	229	2.309	231
Pr	25.5	0.241	26
Nd	94.5	0.957	95
Sm	17.5	0.196	18
Eu	4.1	0.042	4
Gd	14	0.159	14
Tb	2.1	0.022	2
Dy	12	0.134	12
Ho	2.4	0.027	2.4
Er	6.8	0.077	6.9
Tm	0.9	0.010	0.9
Yb	6.6	0.069	6.7
Lu	0.9	0.010	0.9
Y	63.5	0.789	64
Сумма	625	6.93	632
%	99	1	100
La/Y	1.86	1.38	1.86
La/Y	alQ		0.84
La/Y	Почвы		0.73

бины не превышающей 2 м, практически до кровли мерзлых грунтов.

Все РЗЭ по растворенным формам миграции химических элементов относятся к 8-электронным элементам-комплексообразователям, кото-

рые характеризуются низкой степенью растворимости своих гидрооксидных соединений, но способны к образованию растворимых комплексных соединений с ведущими катионами воды [1]. Поэтому некоторая часть РЗЭ способна переходить в растворимые формы и проникать в СТС, достигая надмерзлотных грунтовых вод. Сравнение концентрации РЗЭ в твердой фазе снежного покрова и в надмерзлотных водах, проведенное на ряде участков города, показало функциональную взаимосвязь концентрации La и Ce во ВВ зимней атмосферы и подземных водах (рис. 4).

Подвижности РЗЭ в грунтах СТС и надмерзлотных водах способствует и определенная открытость грунтов, окислительно-восстановительный потенциал которых в СТС равен в среднем 419 мВ.

Наблюдаемая зависимость между концентрацией La и Ce в ВВ зимней атмосфере и надмерзлотных водах аналогичная таковой для Th и U, поскольку РЗЭ являются химическими аналогами актинидов [9–11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии макро- и микроэлементов, в том числе и группы редкоземельных элементов. РЗЭ формируют обширные малоконтрастные ореолы преимущественно в северной промышленной части города.

ВВ в приземной летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. В летней атмосфере РЗЭ в комплексе с группой сидерофильных элементов концентрируются преимущественно в пылевой фракции ВВ (PM_{10–100}). Зимние ВВ в основном представлены фракцией PM₁₀.

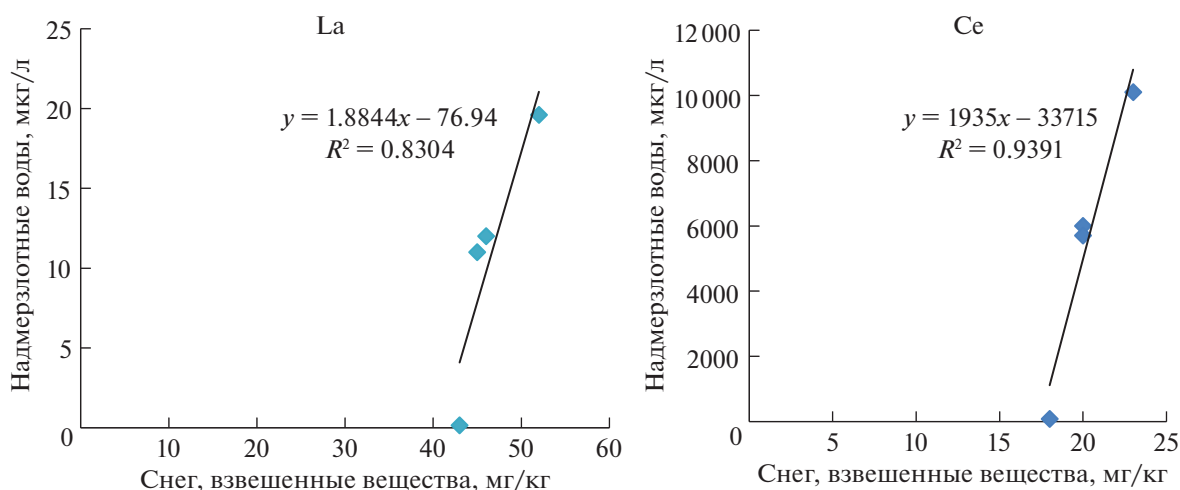


Рис. 4. Концентрация РЗЭ в снежном покрове и надмерзлотных водах.

Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с РЗЭ, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: апатит и циркон, суммарная концентрация которых в тяжелой фракции летних ВВ равна 6%.

Концентрация РЗЭ равномерно понижается в системе: почвы → ВВ летние → ВВ зимние (снег). В почвах и в атмосфере (летних и зимних ВВ) преобладает группа легких РЗЭ.

Основная масса РЗЭ (~99%) выпадает из атмосферы в пылевой фазе в теплый период года. Ежедневное поступление РЗЭ из атмосферы на территорию города в это время составляет в среднем 625 мкг/м² сут (отношение La/Y = 1.8), в их составе преобладают Се, La и Nd. На зимние твердые выпадения ВВ приходится всего около 1% от общей массы поступления РЗЭ из атмосферы. Ежедневное суммарное поступление РЗЭ из атмосферы в холодный период на два порядка ниже, чем летом – 6.93 мкг/м² сут (отношение La/Y = 1.4). Максимальный объем атмосферных выпадений наблюдается для La и Се – 1–2 мкг/м² сут.

Общий объем поступления РЗЭ на территорию города – около 633 мкг/м² год (примерно 1.2 · 10⁻²% от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы). Основную массу выпадений слагают Се, La, Nd и Y. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать в 2–3 раза, также за счет этой группы РЗЭ.

Основными источниками поступления РЗЭ в приземную атмосферу Якутска являются пыление с поверхности почв и выбросы автотранспорта; в меньшей степени – выбросы объектов энергетики и стройиндустрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренбойм Г.М., Авандеева О.П., Коркина Д.А. Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // Вода: химия и экология. 2014. № 5. С. 42–55.
2. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. Геология и полезные ископаемые России. Т. 3. Восточная Сибирь. Спб.: ВСЕГЕИ, 2002. 396 с.
4. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. Геогр., 1959. № 3. С. 3–19.
5. Захаров И.С., Контрош Л.В., Храмов А.В., Шумилов О.И. К вопросу об экологической опасности редкоземельных металлов // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2018. № 8. С. 91–97.
6. Макаров В.Н. Экогеохимия окружающей среды города, расположенного в криолитозоне (на примере Якутска) // Региональная экология. 2016. № 4 (46). С. 7–21.
7. Павлова Н.А., Данзанова М.В. Межгодовая изменчивость химического состава техногенных криопэггов на территории города Якутска // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 6. С. 26–34.
8. Подъячев Б.П. Геохимические аномалии благородных металлов в осадочных отложениях Якутского поднятия // Система коренной источник-россыпь. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. С. 166–173.
9. Brookins D.G. Aqueous geochemistry of the rare earth elements // Rev. Mineral. Geochem., 1989. V. 21. P. 201–225.
10. Chapman N.A., McKinley I.G., Franca E.P., Shea M.E. and Smellie J. A.T. The Pocos-de-Caldas project – an introduction and summary of its implications for radioactive waste disposal // J. of Geochemical Exploration. 1992. V. 45. Is. 1–3. P. 1–24. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90120-W](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90120-W)
11. Choppin G.R. Comparative solution chemistry of the 4f and 5f elements // J. Alloy. Compd., 1995. V. 223. Is. 2. P. 174–179. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)09002-5](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)09002-5)
12. Zhang H., Feng J., Zhu W., Liu C., et al. Chronic toxicity of rare-earth elements on human beings: implications of blood biochemical indices in REE-high regions, South Jiangxi / Biol. Trace Elem. Res., 2000. V. 73. Is. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1385/BTER:73:1:1>
13. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/ & Francis Group Taylor. 2010. 548 p. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>
14. Yuhui M., Jingkun W., Can P., Yayun D., et al. Toxicity of cerium and thorium on Daphnia magna / Ecotoxicol Environ Saf. 2016. № 134. P. 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.006>
15. Zereini F., Wiseman C.L.S. Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts Heidelberg: Springer–Verlag Berlin. 2011. 656 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12278-1>

RARE-EARTH ELEMENTS IN THE ATMOSPHERE OF YAKUTSK

V. N. Makarov^{a, #}

^a Melnikov Permafrost Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010 Russia

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

In 2019–2020, the distribution of rare-earth elements (REE) in the urban atmosphere of Yakutsk was studied. The chemical composition of particulate matter was examined in the summer and winter (the snow cover) atmosphere. The results indicate that in summer REE primarily concentrate in the dust fraction of particulate

matter, together with siderophilic elements. Wintertime particulate matter is more dispersed. The average REE concentrations are $0.0n-10n$ in the summer particulate matter and $0.0n-n$ mg/kg in the winter particulate matter. The system “soil – particulate matter dust – particulate matter snow” shows a uniform decrease in REE concentration and a gradual reduction in the La/Y ratio. The bulk of atmospheric REEs (about 99%) is deposited during summer. The average deposition flux for the city is $625 \mu\text{g}/\text{m}^2 \text{ day}$, primarily consisting of La, Ce, Nd and Y. In the northern, industrial part of Yakutsk with more contrasting anomalies, the flux is two to three times higher. A total REE deposition comprises approximately $1.2 \cdot 10^{-2}\%$ of the annual atmospheric deposition of pollutants in Yakutsk.

Keywords: atmosphere, particulate matter, urban, rare-earth elements, snow cover

REFERENCES

1. Barenboim, G.M., Avandeeva, O.P., Korkina, D.A. *Redkozemel'nye elementy v vodnykh ob'ektakh (ekologicheskie aspekty)* [Rare earth elements in water bodies (ecological aspects)]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2014, no. 5, pp. 42–55. (in Russian)
2. Vinogradov, A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russian)
3. *Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii* [Geology and minerals of Russia]. Vol. 3. Eastern Siberia. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2002, 396 p. (in Russian)
4. Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. *Klassifikatsiya klimatov SSSR* [Classification of climates of the USSR]. *Izv. AN SSSR. Ser. geogr.*, 1959, no. 3, pp. 3–19. (in Russian)
5. Zakharov, I.S., Kontrosh, L.V., Khramov, A.V., Shumilov, O.I. *K voprosu ob ekologicheskoi opasnosti redkozemel'nykh metallov* [On the issue of ecological hazard of rare earth metals]. *Izvestiya SPbGETU “LETI”*, 2018, no. 8, pp. 91–97. (in Russian)
6. Makarov, V.N. *Ekogeokhimiya okruzhayushchei sredy goroda, raspolozhennogo v kriolitozone (na primere Yakutsk)* [Ecogeochemistry of the environment of a city located in the permafrost zone (on the example of Yakutsk)]. *Regional'naya ekologiya*, 2016, no. 4 (46), pp. 7–21. (in Russian)
7. Pavlova, N.A., Danzanova, M.V. *Mezhdogovaya izmenchivost' khimicheskogo sostava tekhnogennykh kriopegov na territorii goroda Yakutsk* [Interannual variability of the chemical composition of technogenic cryopegs on the territory of the city of Yakutsk]. *Kriosfera Zemli*, 2018, vol. XXII, no. 6, pp. 26–34. (in Russian)
8. Podyachev, B.P. *Geokhimicheskiye anomalii blagorodnykh metallov v osadochnykh otlozheniyakh Yakutskogo podnyatiya* [Geochemical anomalies of precious metals in sedimentary deposits of the Yakut uplift]. Primary source-placer system. Yakutsk, YSC SB RAS Publishing House, 2009, pp. 166–173. (in Russian)
9. Brookins, D.G. Aqueous geochemistry of the rare earth elements. *Rev. Mineral. Geochem.* 1989, vol. 21, pp. 201–225.
10. Chapman, N.A., McKinley, I.G., Franca, E.P., Shea, M.E. and Smellie, J.A.T. The Pocos-de-Caldas project – an introduction and summary of its implications for radioactive waste disposal. *J. Geochem. Explor.*, 1992, vol. 45, issues 1–3, pp. 1–24.
11. Choppin, G.R. Comparative solution chemistry of the 4f and 5f elements. *J. Alloy. Compd.*, 1995, vol. 223, issue 2, pp. 174–179.
12. Zhang, H., Feng, J., Zhu, W., Liu, C., Xu, S., et al. Chronic toxicity of rare-earth elements on human beings: implications of blood biochemical indices in REE-high regions, South Jiangxi. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2000, vol. 73, no. 1, pp. 1–17.
13. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, FL, USA, CRC Press / & Francis Group Taylor. 2010. 548 p.
14. Yuhui, M., Jingkun, W., Can, P., Yayun, D., Xiao, H., et al. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna*. *Ecotoxicol Environ Saf.*, 2016, no. 134, pp. 226–232.
15. Zereini, F., Wiseman, C.L.S. Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2011. 656 p.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 528.873

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ
ОЦЕНКЕ ПОРАЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО СООРУЖЕНИЯ© 2022 г. А. С. Викторов^{1,*}, М. В. Архипова¹¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: vic_as@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 08.04.2022 г.

Цель настоящего исследования – разработка метода использования материалов дистанционных съемок для оценки вероятности поражения линейного сооружения на примере боковой речной эрозии. В основу предлагаемого подхода вероятностной оценки поражения инженерного сооружения боковой эрозией положено то, что процесс боковой эрозии, изгибания и спрямления излучин является одновременно главным фактором формирования морфологической структуры ландшафта аллювиальных равнин. Основание решения – математическая модель морфологической структуры аллювиальных равнин. Проведена значительная проверка модели по материалам космических съемок участков долин, находящихся в различных физико-географических условиях. Общей закономерностью строения ландшафтного рисунка аллювиальных равнин в различных физико-географических условиях является экспоненциальное распределение стрелок пакетов и времени развития излучины, что подтверждается большим экспериментальным материалом. На основе модели морфологической структуры аллювиальных равнин получено в ограниченных условиях решение задачи количественной оценки вероятности поражения линейного сооружения речной эрозией; необходимые параметры могут быть оценены по материалам повторных космических съемок.

Ключевые слова: математическая морфология ландшафта, аллювиальные равнины, вероятность поражения сооружений, методы дистанционного зондирования, моделирование, речная эрозия, оценка риска

DOI: 10.31857/S0869780922030080

Многие исследования посвящены оценке вероятности поражения линейных сооружений опасными экзогенными процессами, в частности боковой эрозией рек [4, 5, 11, 12, 14]. Достаточно широко применение нашло и использование материалов дистанционных съемок при изучении речной эрозии [9, 10]. В различных работах исследовалось воздействие различных факторов на исследуемый процесс и риск поражения сооружения [8, 9, 15–19], однако задача не может считаться до конца решенной. Особую сложность данной задаче придает цикличность процесса, связанная с изгибанием и последующим спрямлением излучин, которое затрудняет оценку риска поражения сооружения даже при известной скорости размыва.

Цель настоящего исследования – разработка метода использования материалов дистанционных съемок для оценки вероятности поражения линейного сооружения на примере боковой речной эрозии.

МЕТОДИКА

В основу предлагаемого подхода вероятностной оценки поражения инженерного сооружения

боковой эрозией положено то, что процесс боковой эрозии, изгибания и спрямления излучин является одновременно главным фактором формирования морфологической структуры ландшафта аллювиальных равнин. В силу этого в основу решения поставленной задачи могут быть положены подходы, используемые в математической морфологии ландшафта [1, 3]. Их преимущество заключается в возможности использования материалов космических съемок вместо трудно получаемой контактной информации на основе стационарных наблюдений.

Рассматриваемые аллювиальные равнины представляют собой гривистую поверхность с сочетанием гидроморфных и ксероморфных растительных сообществ, пересеченную руслами меандрирующих рек (рис. 1).

Главнейшими элементами аллювиальных равнин являются:

- старичные (древнестаричные) понижения,
- бывшие прирусловые повышения.

Понижения заняты озерами, болотами и другими гидроморфными комплексами и имеют дугообразную форму, наследуемую от бывших излу-

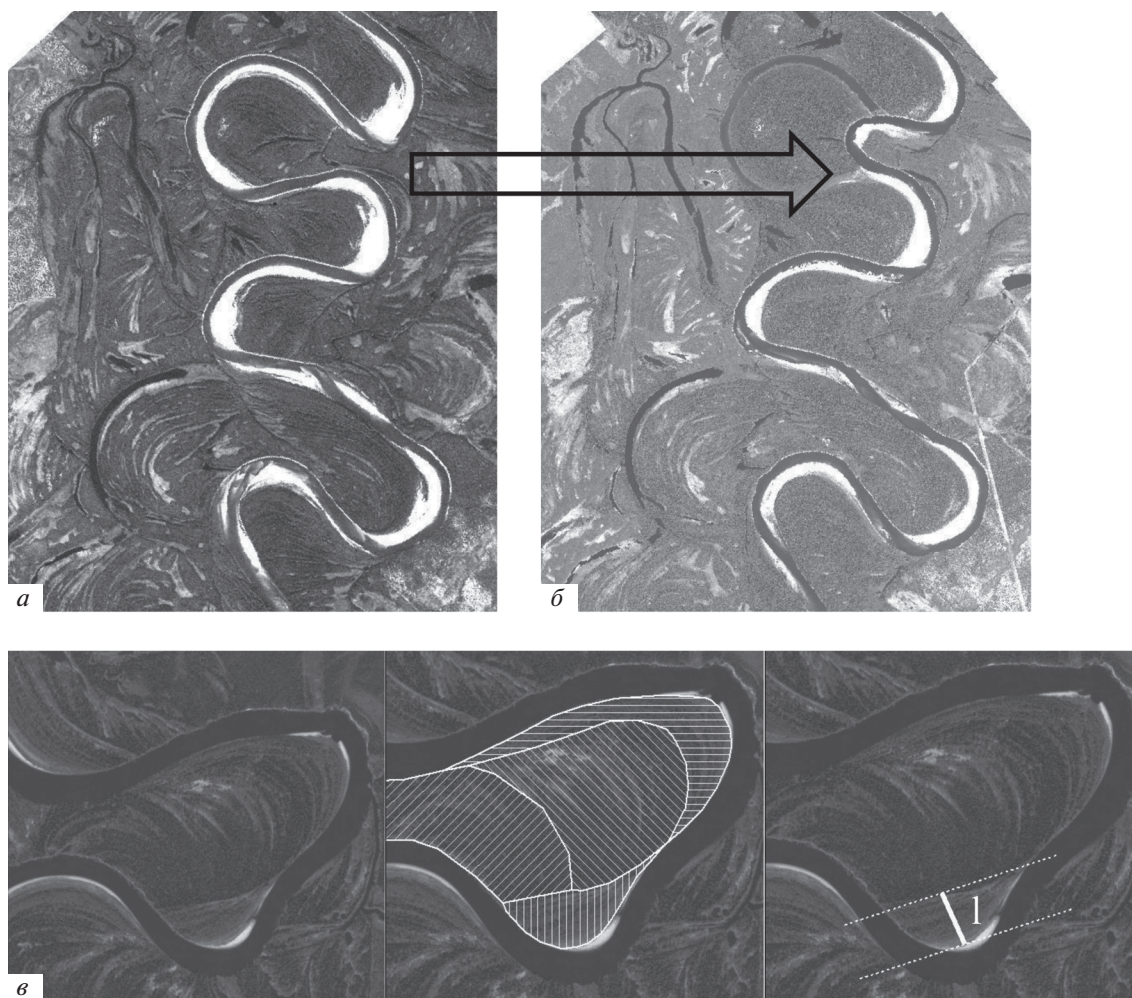


Рис. 1. Изображения аллювиальных равнин на материалах космической съемки: р. Хейгияха: *а* – 1964 г. (проект Согона); *б* – 2017 г., стрелкой показано место спрямления излучины; *в* – излучины р. Юган с пакетами разного возраста: старые – косая штриховка, современные формирующиеся – вертикальная и горизонтальная штриховка. 1 – стрелка в молодом пакете.

чин. Повышения, также представляющие собой дуги, заняты более ксероморфными природно-территориальными комплексами в соответствии с зональными, климатическими и геолого-геоморфологическими условиями. Повышения и понижения, прилегают друг к другу, образуют согласованные по форме и ориентировке пакеты дуг (сегменты) (см. рис. 1*в*). Пакеты разных генераций без видимого порядка и с угловым несогласием прилегают друг к другу, порой “съедают” части друг друга, создавая “рисунок футбольного мяча”, и образуют, таким образом, ландшафтный рисунок аллювиальных равнин.

Один из основных процессов развития аллювиальных равнин – размыв излучин, сопровождающийся их изгибом и завершающийся спрямлением и формированием пакета (см. рис. 1*а, б*). Затем начинается новый цикл изгибания и формирования следующего пакета. Хордой излучины

в рамках настоящей статьи мы называем отрезок, соединяющий соседние точки перегиба (с нулевой кривизной), которые являются границей излучины; стрелками пакета по аналогии со стрелкой дуги мы называем размер пакета в направлении, перпендикулярном хорде основания (см. рис. 1*в*). Интервал времени от спрямления до следующего спрямления назовем циклом развития излучины. Длительность цикла развития излучины регулируется случайными факторами: погодными условиями, локальными особенностями грунтов и др., и может рассматриваться как случайная величина.

Методика исследования включала:

- формирование модели развития процесса и получение результатов ее анализа;
- эмпирическую проверку модели, включающую:

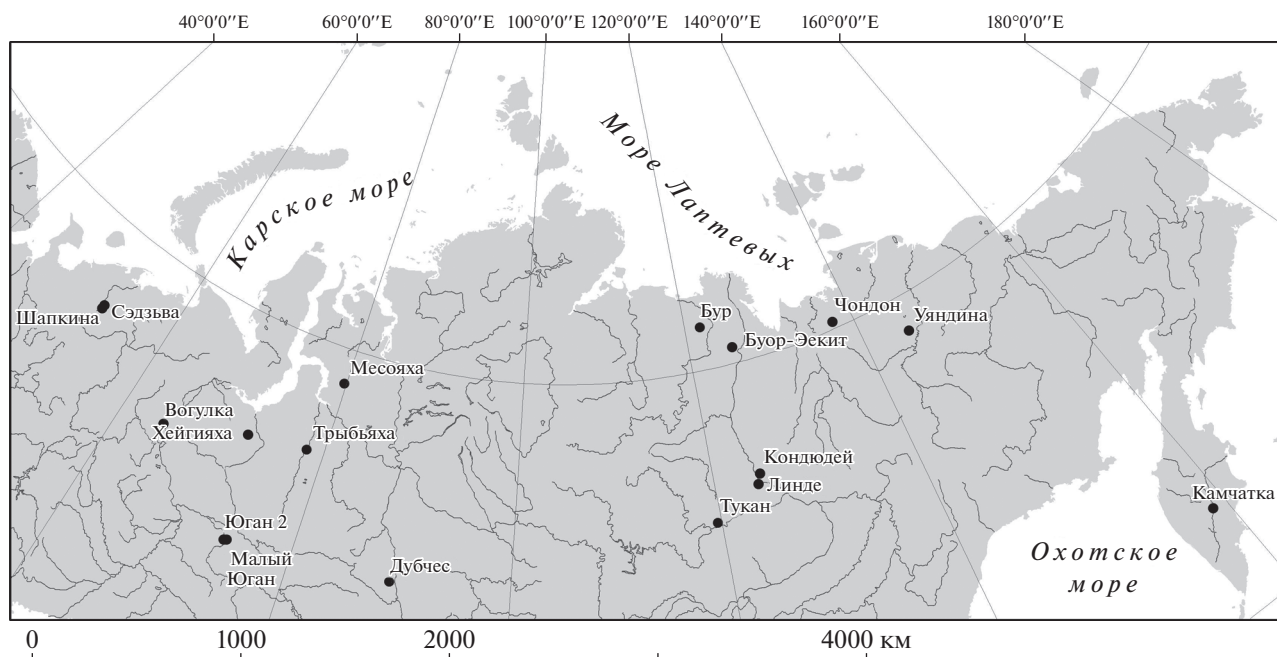


Рис. 2. Схема расположения ключевых участков.

- выбор ключевых участков,
- измерение необходимых параметров по материалам космической съемки;
 - проверку результатов анализа модели на основе использования статистических критериев;
 - аналитическое решение оценки вероятности поражения линейного сооружения боковой эрозией на основе сформированной модели.

Выбор ключевых участков базировался на соответствии критериям заявленной модели – выбирались участки рек со свободным меандрированием, также учитывалась морфологическая однородность рисунка аллювиальных равнин на материалах космической съемки. Участки выбирались с захватом пойменной зоны, они были вытянуты вдоль течения реки, длина участков составляла от 10 до 30 км. Участки расположены в различных зонально-климатических и физико-географических условиях (рис. 2).

Для изучения были выбраны космические снимки:

- архивные снимки Corona (3–7 м/пикс, 1964–1980 гг.);
- современные высокодетальные снимки 0.5–0.7 м/пикс (Pleiades, Worldview 2, 2011–2018 гг.).

Все снимки были координатно привязаны в программном пакете ArcGIS.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первый этап решения поставленной задачи – формирование модели развития процесса и получение результатов ее анализа.

В более ранних исследованиях [7, 3, 6] была создана модель развития морфологической структуры аллювиальных равнин. Из допущений модели для решения поставленной задачи необходимы только следующие:

1) вероятность спрямления излучины за интервал времени Δt зависит от величины этого интервала и не зависит от поведения других излучин, при этом вероятность более чем одного спрямления в малый интервал времени много меньше, чем вероятность одного спрямления:

$$p_1 = \mu \Delta t + o(\Delta t),$$

$$p_k = o(\Delta t), \quad k = 2, 3, \dots$$

где μ – параметр (среднее число спрямлений излучин за единицу времени);

2) рост ширины пакета за счет формирования грив и межгривных понижений происходит с постоянной скоростью ϵ .

Предполагается также отсутствие существенного изменения климатических условий, что проявилось бы в непостоянстве значений параметров.

В итоге математического анализа допущений получены выражения, описывающие развитие морфологической структуры аллювиальных равнин в однородных условиях для случая постоянства климатических условий, в частности [7, 3, 6]:

• спрямление излучин может быть описано вероятностным процессом – процессом Пуассона, т.е. вероятность k спрямлений за временной интервал t равна:

$$P(k, t) = \frac{(\mu t)^k}{k!} e^{-\mu t};$$

• время развития излучины и текущее время развития излучины (от последнего спрямления до момента рассмотрения) подчиняются экспоненциальному распределению:

$$F_{\tau}(x) = 1 - e^{-\mu x}.$$

Этот результат, который является опорным для дальнейших построений, нуждается в более репрезентативной эмпирической проверке.

Поскольку скорость роста пакета является постоянной, и если время развития излучины подчиняется экспоненциальному распределению, то и длина стрелки пакета, которая пропорциональна времени развития излучины, должна подчиняться экспоненциальному распределению, но с отличным значением параметра:

$$F_{\mu}(x) = 1 - e^{-\frac{\mu}{\varepsilon} x}.$$

Однако эмпирическую проверку модели нельзя напрямую основывать на этой закономерности, так как в процессе развития аллювиальной равнины пакеты частично или полностью стираются. Рассмотрение этой ситуации было проведено ранее при анализе возрастной дифференциации аллювиальных равнин [2]. Было показано, что, несмотря на стирание сформировавшихся (“старых”) пакетов, длины стрелок их сохранившихся фрагментов должны иметь то же самое экспоненциальное распределение. Это может быть одной из основ эмпирической проверки.

С другой стороны, проведенный с использованием теории специального класса случайных процессов (процессов восстановления) анализ позволил показать, что длины стрелок еще формирующихся (“молодых”) пакетов также должны подчиняться экспоненциальному распределению [2]. Это может быть использовано как вторая основа эмпирической проверки.

Таким образом, проверка состояла в оценке согласия эмпирических распределений длин стрелок пакетов и (отдельно) молодых пакетов экспоненциальному распределению:

$$F_{\mu}(x) = 1 - e^{-\lambda x},$$

где λ – параметр.

Для проверки полученных выводов по модели аллювиальных равнин была предпринята обработка материалов дистанционных съемок на участках аллювиальных равнин ряда рек Западной и Восточной Сибири и Камчатки (см. рис. 2)

(первичное эмпирическое обоснование содержится в более ранних работах [1–3, 7]).

Для каждого космического снимка в пределах однородного участка долины были выделены все возможные стрелки фрагментов пакетов количеством не менее 80 (выборка стрелок в “молодых” пакетах включала не менее 50 измерений), и определен их линейный размер. Стрелки в молодых развивающихся пакетах проводились как перпендикуляр между основанием пакета (хордой) и параллельной ей касательной к вершине пакета. Стрелки в фрагментах старых пакетов проводились как перпендикуляр между касательной в вершине дуги основания и параллельной ей касательной к вершине дуги, ограничивающей фрагмент пакета с внешней стороны. В ряде случаев возникали трудности, связанные со стиранием боковой части фрагментов из-за смещения русла, однако в целом, несмотря на указанную неопределенность, в подавляющем большинстве случаев стрелки удавалось провести. Прилегающие фрагменты пакетов отделялись друг от друга на основе угловых несогласий.

Полученные выборки сравнивались с экспоненциальными распределениями со сдвигом. Использование экспоненциальных распределений со сдвигом связано с тем, что на снимках при анализе выделяются фрагменты пакетов, состоящих как минимум из двух грив и одного межгивного понижения, а из одной гривы не выделяются, это и определяет сдвиг. В выборках оценивался сдвиг как минимальное значение выборки, и осуществлялся переход к промежуточной выборке путем вычитания сдвига. Полученная выборка проверялась на согласие с экспоненциальным распределением на основе критерия Пирсона (хи-квадрат) с помощью программы Statistica.

Эмпирическая проверка для модели аллювиальных равнин дала следующие основные результаты.

Для 21 выборки из 22 (13 участков из 14) распределение стрелок всех пакетов отвечает экспоненциальному распределению со сдвигом (табл. 1, рис. 3), как это следует из модели.

Для “молодых” стрелок проверка проводилась отдельно. Проведенный анализ показал, что для 22 выборок (11 участков) распределение стрелок для всех пакетов отвечает экспоненциальному распределению со сдвигом (табл. 2, рис. 3), как это и следует из модели.

Таким образом, проведенная экспериментальная проверка показала, что сформированная модель (точнее ее фрагмент [6, 7]) согласуется с эмпирическими данными и может быть использована для решения поставленной задачи.

Таблица 1. Соответствие эмпирических распределений стрелок аллювиальных пакетов экспоненциальному распределению со сдвигом

Номер	Местоположение	Год съемки	Объем выборки	Сдвиг, м	Параметр λ , 1/м	хи-квадрат	хи-квадрат (0.95)
1	Долина р. Шапкина (Коми)	1976	84	32	0.002877	2.944	11.070
2	Долина р. Шапкина (Коми)	2017	84	37	0.003039	3.119	11.070
3	Долина р. Вогулка (Западная Сибирь)	2013	89	47	0.003824	23.231	15.507
4	Долина р. Хейгияха (Западная Сибирь)	1964	76	67	0.002967	6.217	11.070
5	Долина р. Хейгияха (Западная Сибирь)	2017	75	54	0.002873	4.682	11.070
6	Долина р. Юган (Западная Сибирь)	1970	83	59	0.004571	1.430	9.488
7	Долина р. Юган (Западная Сибирь)	2012	83	59	0.004607	1.917	9.488
8	Долина р. Трыбьяха (Западная Сибирь)	2013	73	22	0.005939	8.382	11.070
9	Долина р. Мудуйяха (Западная Сибирь)	2013	141	97	0.002052	9.496	11.070
10	Долина р. Дубчек (Западная Сибирь)	2017	86	79	0.002512	8.78	14.067
11	Долина р. Бур (Средняя Сибирь)	2018	86	57	0.002043	5.835	9.488
12	Долина р. Буор-Эекит (Средняя Сибирь)	1968	77	50	0.005536	2.656	7.815
13	Долина р. Буор-Эекит (Средняя Сибирь)	2018	79	44	0.005425	8.531	12.592
14	Долина р. Тукан (Средняя Сибирь)	2017	80	19	0.004828	6.787	14.067
15	Долина р. Кондюдей (Средняя Сибирь)	1980	89	17	0.004121	2.298	9.488
16	Долина р. Кондюдей (Средняя Сибирь)	2017	89	39	0.004421	0.852	9.488
17	Долина р. Чондон (Восточная Сибирь)	1965	109	18	0.004201	1.5688	11.070
18	Долина р. Чондон (Восточная Сибирь)	2018	111	18	0.004148	2.470	11.070
19	Долина р. Уяндина (Восточная Сибирь)	1975	101	56	0.001887	2.360	11.070
20	Долина р. Уяндина (Восточная Сибирь)	2018	104	100	0.002022	3.536	11.070
21	Долина р. Камчатка (Камчатка)	1975	88	55	0.003108	8.155	11.070
22	Долина р. Камчатка (Камчатка)	2017	116	36	0.003501	9.179	12.592

Примечание. Жирным шрифтом выделено значение критерия в выборках, в которых наблюдается согласие с теоретическим распределением.

Обоснованная выше модель дает возможность оценить вероятность поражения линейного сооружения речной эрозией.

Расчет значений вероятности поражения линейного сооружения за заданное время функционирования должен учесть повторение циклов развития излучины и последующих спрямлений, а значит и повторение циклов размыва, и возможность поражения сооружения не в первый цикл, а в последующие.

Рассмотрим излучину и линейное сооружение, отстоящее на расстояние L от хорды излучины (рис. 4). Примем упрощение, состоящее в том, что линейное сооружение параллельно хорде излучины.

Найдем вероятность поражения линейного сооружения за время t , при этом ограничимся рассмотрением интервала времен $t \leq 2t_0$, где t_0 – время достижения излучиной линейного сооружения при непрерывном размыве (от момента спрямления):

$$t_0 = \frac{L}{\varepsilon}. \tag{1}$$

Поражение линейного сооружения боковой эрозией на k -ом цикле отвечает выполнению условия:

$$\tau_k \geq t_0,$$

где τ_k – длительность k -го цикла развития излучины.

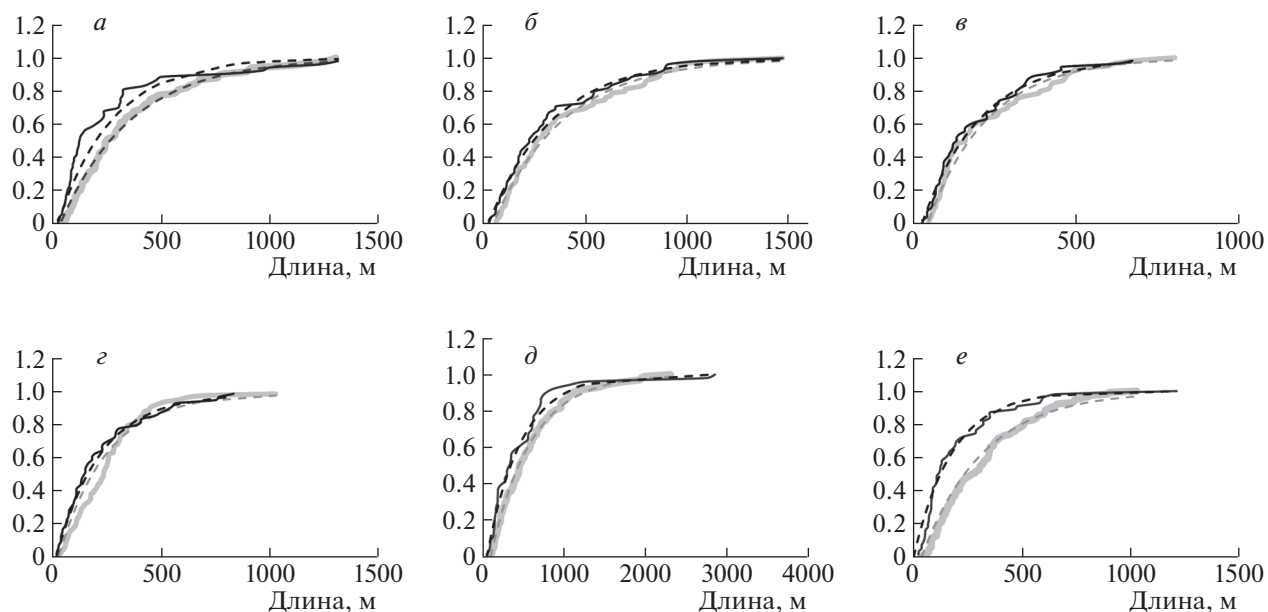


Рис. 3. Графики эмпирического и теоретического распределения длин стрелок пакетов для: *a* – р. Шапкина (2017), *б* – р. Хейгияха (2017), *в* – р. Буор-Экит (2018), *г* – р. Чондон (2018), *д* – р. Уяндина (2018), *е* – р. Камчатка (2017). Штриховыми линиями показаны теоретические распределения, сплошными – эмпирические распределения длин стрелок пакетов; серым цветом показаны распределения для всей совокупности стрелок, черным – распределения для молодых (формирующихся) стрелок.

Поражение линейного сооружения боковой эрозией на k -ом цикле в первый раз (без поражения на предыдущих циклах) отвечает выполнению условий:

$$\tau_i < t_0, \quad 0 \leq i \leq k-1, \\ \tau_k \geq t_0.$$

Учитывая независимость циклов и экспоненциальное распределение их длительности, вероятность

поражения линейного сооружения боковой эрозией в первый раз на k -ом цикле можно записать выражением:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} \times \\ \times \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-1} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda e^{-\lambda x_1} \lambda e^{-\lambda x_2} \dots \lambda e^{-\lambda x_{k-1}} dx_{k-1} dx_{k-2} \dots dx_1.$$

Интегрируя по последней переменной, получаем:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda e^{-\lambda x_1} \lambda e^{-\lambda x_2} \dots \lambda e^{-\lambda x_{k-2}} \times \\ \times \int_0^{\min[t_0, (t-t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})]} \lambda e^{-\lambda x_{k-1}} dx_{k-1} dx_{k-2} \dots dx_1.$$

Так как $t \leq 2t_0$ и, следовательно, $(t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2}) \leq t_0$, а значит

$$\min[t_0, (t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})] = \\ = (t - t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2}),$$

то

$$P_k(t) = \\ = e^{-\lambda t_0} \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda e^{-\lambda x_1} \lambda e^{-\lambda x_2} \dots \lambda e^{-\lambda x_{k-2}} \times \\ \times \int_0^{(t-t_0) - (x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})} \lambda e^{-\lambda x_{k-1}} dx_{k-1} dx_{k-2} \dots dx_1,$$

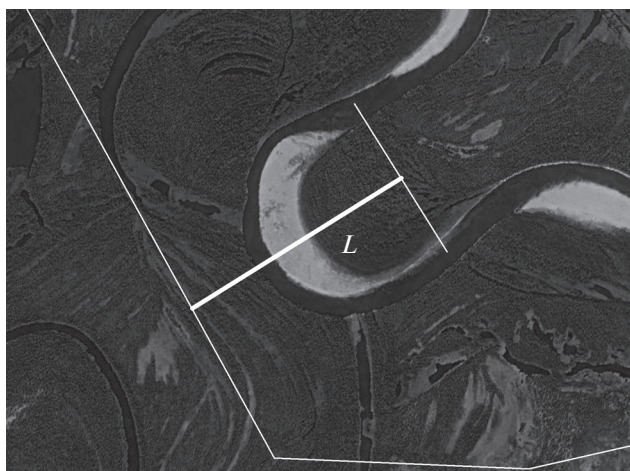


Рис. 4. Схема к выводу выражения вероятности поражения линейного сооружения боковой эрозией: тонкими белыми линиями показаны линейное сооружение и хорда излучины, L показана утолщенной белой линией; пояснение в тексте.

Таблица 2. Соответствие эмпирических распределений длин стрелок “молодых” аллювиальных пакетов экспоненциальному распределению со сдвигом

Номер	Местоположение	Год съемки	Объем выборки	Сдвиг, м.	Параметр λ , 1/м	хи-квадрат	хи-квадрат (0.95)
1	Пойма р. Шапкина	1976	53	25	0.004645	1.899	7.815
2	Пойма р. Шапкина	2017	53	25	0.003961	7.506	7.815
3	Пойма р. Сэдьзва	1976	53	21	0.006619	1.188	9.488
4	Пойма р. Сэдьзва	2017	50	21	0.006571	4.867	9.488
5	Пойма р. Хейгияха	2017	56	32	0.003123	5.760	9.488
6	Пойма р. Хейгияха	1964	56	31	0.003153	4.160	9.488
7	Пойма р. Юган	2012	52	27	0.004163	0.606	7.815
8	Пойма р. Юган	1970	51	43	0.004579	1.816	7.815
9	Пойма р. Малый Юган	2012	61	17	0.005762	0.856	5.99
10	Пойма р. Малый Юган	1970	57	13	0.00594	4.544	11.07
11	Пойма р. Буор-Эекит	2018	55	47	0.002343	5.430	5.99
12	Пойма р. Буор-Эекит	1968	60	34	0.004938	2.010	7.815
13	Пойма р. Линде	2017	55	27	0.003436	5.370	9.488
14	Пойма р. Линде	1980	55	32	0.003289	8.186	9.488
15	Пойма р. Кондюдей	2017	68	19	0.006955	1.110	9.488
16	Пойма р. Кондюдей	1980	68	19	0.007304	0.617	9.488
17	Пойма р. Уяндина	2018	53	74	0.002383	1.101	5.99
18	Пойма р. Уяндина	1975	56	54	0.002374	5.214	5.99
19	Пойма р. Чондон	1965	57	18	0.00568	1.793	9.488
20	Пойма р. Чондон	2018	52	18	0.004934	4.072	11.07
21	Пойма р. Камчатка	2017	58	22	0.005626	1.807	5.99
22	Пойма р. Камчатка	1975	57	35	0.003619	4.322	9.488

Примечание. Жирным шрифтом выделено значение критерия в выборках, в которых наблюдается согласие с теоретическим распределением.

и, интегрируя по x_{k-1} , после упрощения, получаем:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} \left[\int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \dots \int \lambda^{k-2} e^{-\lambda(x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2})} \times \right. \\ \left. \times dx_{k-2} \dots dx_1 - e^{-\lambda(t-t_0)} \lambda^{k-2} \times \right. \\ \left. \times \int_{\substack{0 \leq x_i \leq t_0 \\ x_1 + x_2 + \dots + x_{k-2} \leq t - t_0}} \int \dots \int dx_{k-2} \dots dx_1 \right].$$

Для второго интеграла можно использовать формулу для объема n -мерного симплекса [13]:

$$\int_{\substack{0 \leq x_i \\ x_1 + x_2 + \dots + x_n \leq h}} \dots \int dx_n \dots dx_1 = \frac{h^n}{n!}.$$

В этом случае получаем:

$$P_k(t) = P_{k-1}(t) - e^{-\lambda t} \lambda^{k-2} \frac{(t - t_0)^{k-2}}{(k - 2)!},$$

и затем:

$$P_k(t) = e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda(t - t_0) + \frac{[\lambda(t - t_0)]^2}{2!} + \dots + \frac{[\lambda(t - t_0)]^{k-2}}{(k - 2)!} \right].$$

Соответственно, суммируя по k , в итоге получаем общую вероятность поражения линейного сооружения боковой эрозией за время t при $t \leq 2t_0$:

$$Q(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ e^{-\lambda t_0} + \sum_{m=0}^{+\infty} \left[e^{-\lambda t_0} - e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^m \frac{[\lambda(t - t_0)]^k}{k!} \right], & t_0 \leq t < 2t_0. \end{cases}$$

Частичная (k -я) сумма этого ряда может быть представлена как:

$$Q_k(t) = kP_k(t) - e^{-\lambda t} \left[1 \cdot 1 + 2\lambda(t-t_0) + 3 \frac{[\lambda(t-t_0)]^2}{2!} + \dots + (k-1) \frac{[\lambda(t-t_0)]^{k-2}}{(k-2)!} \right].$$

Учитывая, что первый член, как можно показать, стремится к нулю, а ряд можно представить, как сумму двух сходящихся рядов, после упрощения получаем выражение:

$$Q(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ [\lambda(t-t_0) + 1]e^{-\lambda t_0}, & t_0 \leq t < 2t_0. \end{cases}$$

Необходимые для расчета вероятности поражения линейного сооружения параметры вытекают из выражений для расчета вероятности поражения линейного сооружения за заданное время функционирования и включают:

- *природные параметры развития процессов:*
 - среднее число спрямлений излучины за единицу времени,
 - скорость размыва борта излучины в точке максимального размыва;
- *задаваемые параметры:*
 - отстояние линейного сооружения от хорды излучины,
 - расчетное время функционирования.

Природные параметры развития процессов должны определяться на основе разработанной модели по материалам космических съемок. Среднее число спрямлений – величина обратная средней длительности цикла развития излучины, а средняя скорость размыва излучины в точке максимального размыва определяется по двум повторным снимкам как отношение величины размыва Δr к интервалу между съемками (Δt):

$$\varepsilon = \frac{\Delta r}{\Delta t}.$$

Таким образом, использование разработанной модели морфологической структуры аллювиальных равнин позволяет получить метод количественной оценки вероятности поражения линейного сооружения боковой эрозией. От части принятых упрощений можно отказаться. Так, например, чуть видоизменив (1), нетрудно учесть ситуацию, когда линейное сооружение непараллельно хорде излучины.

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы.

- Дистанционные методы могут быть использованы при оценке вероятности поражения линейных сооружений.

- Перспективной основой решения задачи оценки вероятности поражения линейных сооружений является использование моделей математической морфологии ландшафта.

- Общей закономерностью строения ландшафтного рисунка аллювиальных равнин в различных физико-географических условиях является экспоненциальное распределение стрелок пакетов и времени развития излучины, что подтверждается большим экспериментальным материалом.

- На основе подходов математической морфологии ландшафта получено в ограниченных условиях решение задачи количественной оценки вероятности поражения линейного сооружения речной эрозией; необходимые параметры могут быть оценены по материалам повторных космических съемок.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С.* Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 180 с.
2. *Викторов А.С.* Модель возрастной дифференциации аллювиальных равнин // *Геозкология*. 2007. № 4. С. 302–309.
3. *Викторов А.С.* Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
4. *Викторов А.С., Архипова М.В., Капралова В.Н., Орлов Т.В.* Математическая модель риска поражения инженерных сооружений иницированными термокарстовыми процессами // *Геозкология*. 2020. № 3. С. 82–90. <https://doi.org/10.31857/S086978092003010>
5. *Викторов А.С., Березин П.В., Капралова В.Н.* Разработка программного пакета оценки природных рисков на основе материалов повторных дистанционных съемок // *Исследование Земли из космоса*. 2017. № 5. С. 57–65. <https://doi.org/10.7868/S0205961417050062>
6. *Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В., Трапезникова О.Н. и др.* Математическая морфология ландшафтов криолитозоны. М.: РУДН, 2016. 232 с.
7. *Викторов А.С., Трапезникова О.Н.* Математическая модель морфологической структуры аллювиальных равнин как одна из основ дешифрирования материалов космических съемок // *Исследование Земли из космоса*. 1997. № 2. С. 44.
8. *Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф., Кирюхина З.П., Добровольская Н.Г.* Экспериментальные

- исследования размыва береговых обрывов и откосов // Геоморфология. 2016. № 2. С. 51–58. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-2-51-58>
9. Падалко Ю.А., Чибилев А.А. Проблемы развития русловых процессов в бассейне р. Урал // ДАН. 2017. Т. 475. № 6. С. 702–705. <https://doi.org/10.7868/S0869565217240215>
 10. Панин А., Сидорчук А., Чернов А. Основные этапы формирования пойм равнинных рек Северной Евразии // Геоморфология. 2011. № 3. С. 20–31.
 11. Скапинцев А.Е., Потапов А.Д., Лаврусевич А.А. Инженерная защита трубопроводов от эрозионных процессов // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 140–151.
 12. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства магистрального газопровода “Сила Сибири” на участке Чайядинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 4. С. 41–55.
 13. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 3. М.: Физматлит, 2003. 662 с.
 14. Чигир В.Г., Власов. С.В., Горбатов В.А., Паух М.В. и др. Использование материалов дистанционных съемок для повышения надежности газопроводов в криолитозоне // Газовая промышленность. 2014. № 7 (709). С. 48–55.
 15. Экология эрозионно-русловых систем России / Р.С. Чалов (ред.) М.: Географический ф-т МГУ, 2002. 163 с.
 16. Roslan Zainal Abidin, Mohd Sofiyana Sulaiman, Naimah Yusoff. Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia // International Soil and Water Conservation Research. 2017. V. 5. Is. 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.01.002>
 17. Joung R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales // Austral. Geogr. 1970. V. 11. № 3. P. 269–277.
 18. Lotsari E., Hackney C., Salmela J., Kasvi E., et al. Subarctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period // Earth Surface Processes and Landforms. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>
 19. Xiaorong Li, James R. Cooper, Andrew J. Plater. Quantifying erosion hazards and economic damage to critical infrastructure in river catchments: Impact of a warming climate // Climate Risk Management. V. 32. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100287>

THE USE OF REMOTE SENSING DATA FOR PROBABILISTIC ASSESSMENT OF IMPACT ON A LINEAR STRUCTURE

A. S. Victorov^{a,#} and M. V. Arkhipova^a

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

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

This research is aimed at developing the remote sensing technique for assessing probability of impact on linear engineering structures by the example of lateral river erosion. The suggested approach for assessing probability of impact on linear engineering structures takes into account the process of lateral erosion, bending and straightening of bends is at the same time the main formatting factor for the landscape morphological pattern of alluvial plains. The base of the technique is a mathematical model of the landscape morphological pattern for alluvial plains. It was essentially tested at key sites within river valleys in different nature environments. The exponential distribution of arrows of the packages and time of bend development is a general law of the landscape morphological pattern of the alluvial plains in different nature environments; numerous testing results confirm it. The model of the alluvial plain morphological pattern gives a solution of the quantitative assessment of the impact probability to a linear structure by river erosion under limited conditions; the necessary parameters can be estimated from the remote sensing data.

Keywords: *mathematical morphology of landscapes, alluvial plains, probability of impact to engineering structures, remote sensing data techniques, modelling, river erosion*

REFERENCES

1. Victorov, A.S. *Matematicheskaya morfologiya landshafta* [Mathematical morphology of landscapes]. Moscow, Tratek Publ., 1998, 180 p. (in Russian)
2. Victorov, A.S. *Model' vozrastnoi differentsiatsii alluvial'nykh ravnin* [Model of age differentiation of alluvial plains]. *Geoekologiya*, 2007, no. 4, pp. 302–309. (in Russian)
3. Victorov, A.S. *Osnovnye problemy matematicheskoi morfologii landshafta* [The main problems of mathematical morphology of landscape]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 252 p. (in Russian)
4. Victorov, A.S., Arkhipova, M.V., Kapralova, V.N., Orlov, T.V. *Matematicheskaya model' riska porazheniya inzhenernykh sooruzhenii initsiirovannymi termokarstovymi protsessami* [Mathematical model for risk of damage to engineering structures by human-induced thermokarst processes]. *Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 82–90. <https://doi.org/10.31857/S0869780920030108> (in Russian)

5. Viktorov, A.S., Berezin, P.V., Kapralova, V.N. *Razrabotka programmnogo paketa otsenki prirodnykh riskov na osnove materialov povtornykh distantsionnykh s'emok* [Development of a software package for natural risk assessment based on repeated remote sensing data]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, no. 5, pp. 57–65. <https://doi.org/10.7868/S0205961417050062> (in Russian)
6. Victorov, A.S., Kapralova, V.N., Orlov, T.V. et al. *Matematicheskaya morfologiya landshaftov kriolitozony* [Mathematical morphology of cryolithozone landscapes]. Moscow, RUDN Publ, 2016, 232 p. (in Russian)
7. Viktorov, A.S., Trapeznikova, O.N. *Matematicheskaya model' morfologicheskoi struktury allyuvial'nykh ravnin kak odna iz osnov deshifirovaniya materialov kosmicheskikh s'yemok* [Mathematical model of the morphological pattern of alluvial plains as one of the bases for remote sensing data interpretation]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1997, no. 2, pp. 44. (in Russian)
8. Larionov, G.A., Litvin, L.F., Krasnov, S.F., Kiryukhina, Z.P., Dobrovol'skaya, N.G. *Eksperimental'nye issledovaniya razmyva beregovykh obryvov i otkosov* [Experimental research of the cliffs and banks washaway]. *Geomorfologiya*, 2016, no. 2, pp. 51–58. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-2-51-58> (in Russian)
9. Padalko, Y.A., Chibilev, A.A. *Problemy razvitiya ruslovykh protsessov v basseine r.Ural* [Problems of riverbed evolution in the basin of the Ural River]. *Doklady Akademii Nauk*, 2017, vol. 475, no. 6, pp. 702–705. <https://doi.org/10.7868/S0869565217240215> (in Russian)
10. Panin, A.V., Sidorchuk, A.Yu., Chernov, A.V. *Osnovnye etapy formirovaniya poim ravninnykh rek Severnoi Evrazii* [The main stages of the flood-plain formation in northern Eurasia]. *Geomorfologiya*, 2011, no. 3, pp. 20–31. (in Russian)
11. Skapintsev, A.E., Potapov, A.D., Lavrusevich, A.A. *Inzhenernaya zashchita truboprovodov ot erozionnykh protsessov* [Engineering protection of pipelines from erosion processes]. *Vestnik MGSU*, 2013, no. 7, pp. 140–151. (in Russian)
12. Strokova, L.A., Ermolaeva, A.V. *Prirodnye osobennosti stroitel'stva magistral'nogo gazoprovoda "Sila Sibiri" na uchastke Chayandinskoe neftegazokondensatnoe mestorozhdenie-Lensk* [Natural features of constructing the main gas pipeline "Power of Siberia" on a Chayandinskoye oil and gas field site – Lensk]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. (in Russian)
13. Fikhtengol'ts, G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus]. Moscow, Fizmatlit Publ., vol. 3, 2003. 632 p. (in Russian)
14. Chigir, V.G., Vlasov, S.V., Gorbatov, V.A., Raukh, M.V., et al. *Ispol'zovanie materialov distantsionnykh s'emok dlya povysheniya nadezhnosti gazoprovodov v kriolitozone* [The use of remote sensing data to improve the reliability of gas pipelines in the permafrost zone]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2014, no. 7 (709), pp. 48–55. (in Russian)
15. *Ekologiya erozionno-ruslovykh sistem Rossii* [Ecology of erosion-channel systems in Russia]. R.S. Chalov, Ed., Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU, 2002, 163 p. (in Russian)
16. Roslan Zainal Abidin, Mohd Sofiyani Sulaiman, Naimah Yusoff. Erosion risk assessment: A case study of the Langat River bank in Malaysia. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 5, issue 1, 2017, pp. 26–35.
17. Joung, R.W. The patterns of some meandering valleys in New South Wales. *Austral. Geogr.* 1970, vol. 11, no. 3, pp. 269–277.
18. Lotsari, E. Hackney, C. Salmela, J. Kasvi, E. Kemp, J. Alho, P. Darby, S.E. Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>.
19. Li, X., Cooper, J.R., Plater, A.J. Quantifying erosion hazards and economic damage to critical infrastructure in river catchments: Impact of a warming climate. *Climate Risk Management*, 2021, vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100287>

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.9+556+551.59

ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ БАШКИРИИ

© 2022 г. Д. Ю. Васильев^{1,2,3,*}, Ю. Г. Воронова¹, С. В. Новиков¹, В. А. Семенов³,
А. А. Чибилёв^{2,**}¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450008 Россия² Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, 11, Оренбург, 460000 Россия³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия*E-mail: vasilev.dyu@ugatu.su**E-mail: orensteppe@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2022 г.

После доработки 06.05.2022 г.

Принята к публикации 18.05.2022 г.

На примере территории Башкирии рассматриваются методические аспекты анализа влияния опасных природных явлений, включающего ранжирование и определение общих характеристик. Используя статистические данные по опасным природным явлениям, числу погибших и материальному ущербу, вычислены значения индекса приведенных потерь за 2012–2020 гг. С помощью индекса приведенных потерь произведены сравнительные оценки опасных природных явлений на территории Башкирии. На основе оперативных данных Государственного комитета Республики Башкортостан по чрезвычайным ситуациям произведено картирование территории республики, выделены районы, подверженные наибольшему воздействию опасных природных явлений. Для территории Башкирии за последние годы отмечен рост числа опасных природных явлений и материального ущерба.

Ключевые слова: опасные природные явления, социально-экономические последствия, экстремальные температуры, смерчи, ураганы, наводнения, лесные пожары, индекс приведенных потерь, Башкирия

DOI: 10.31857/S0869780922040075

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия пристальное внимание исследователей привлечено к изменениям климата, которые требуют принятия незамедлительных действий, поскольку их результаты носят кумулятивный характер и могут оказывать существенное влияние на человечество в целом, а также на отдельные страны и регионы мира. Необходимо отметить тот факт, что для климатических изменений характерна пространственно-временная неоднородность [2, 3, 11–13, 16], в одних регионах они происходят быстрее, в других медленнее. Очевидное последствие климатических изменений – рост числа опасных природных явлений (ОПЯ) [10, 19, 21, 22], которые являются источником социально-экономических потрясений, приводящих к гибели людей и приносящих огромный материальный ущерб [4, 18, 20]. Увеличение не только числа ОПЯ, но и их масштабов, по всей видимости, является следствием проводимой экологической политики (в нашей стране и некоторых зарубежных странах), а также неадекватного развития методов прогнозирования и оценки природных катастроф. Согласно официальному докладу Бюро по сокращению риска бедствий ООН (<https://www.un.org/ru>), количе-

ство стихийных бедствий с 2000 по 2019 г. удвоилось по сравнению с 1980–1999 гг. За последние 20 лет было зарегистрировано 7348 природных катастроф, из них около 3000 бедствий произошли в Азии, 1800 на американском континенте и примерно 1000 в Африке. В результате погибло более 10^6 чел., мировая экономика потеряла около $3 \cdot 10^{12}$ \$.

Цель настоящего исследования – произвести оценку социально-экономических последствий от ОПЯ для территории Башкирии.

ТЕРРИТОРИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

По площади (около 143000 км²) Башкирия занимает 27-е место среди субъектов Российской Федерации, согласно данным Росстата (<https://rosstat.gov.ru>) численность населения республики по состоянию на 2021 г. составляет 4013786 чел., валовый региональный продукт (ВРП) примерно $23 \cdot 10^9$ \$. По административно-территориальному устройству территория Башкирии делится на 54 муниципальных района. На рис. 1 серым цветом обозначены районы республики, в которых, по оперативным данным Государствен-

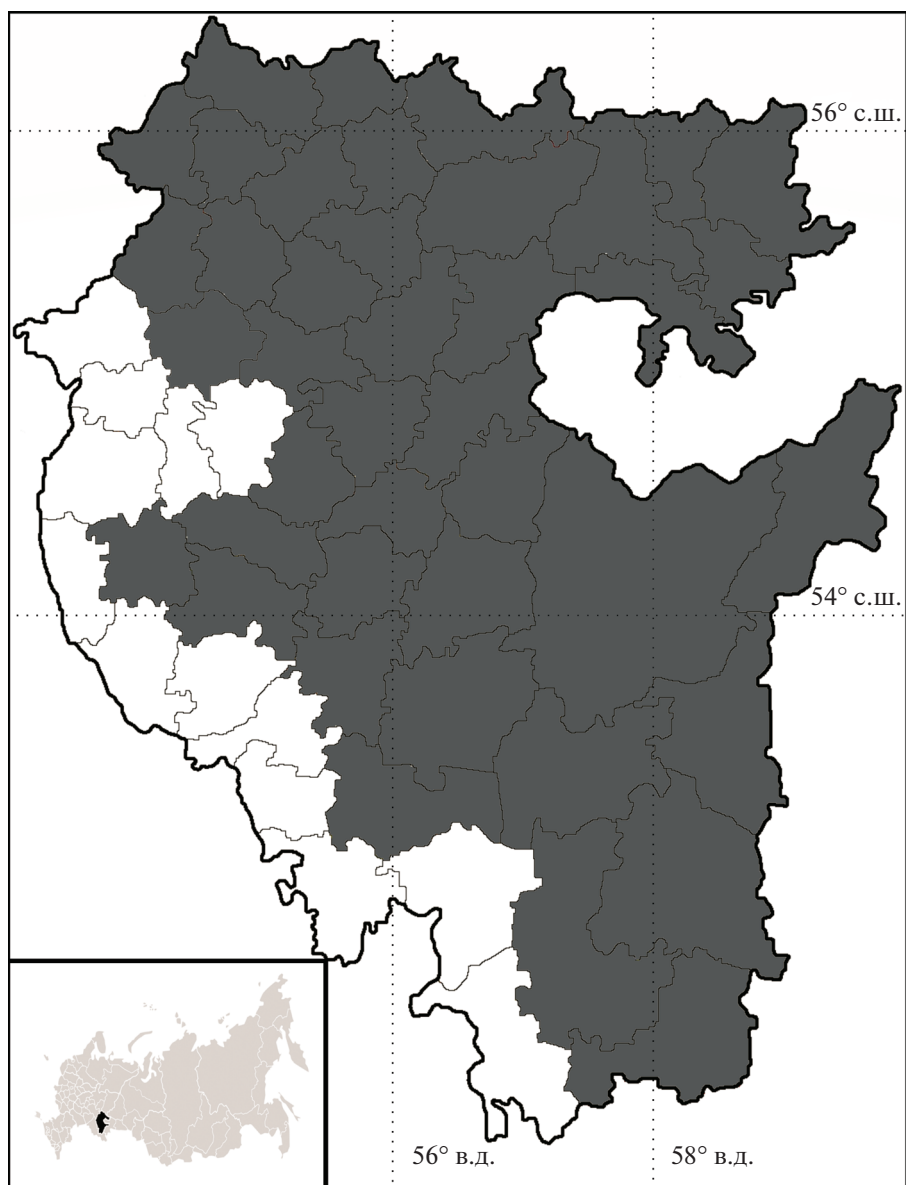


Рис. 1. Карта политико-административного деления Башкирии.

ного комитета Республики Башкортостан по чрезвычайным ситуациям (<https://gkchs.bashkortostan.ru>), чаще всего регистрируются ОПЯ. Базой для анализа послужили данные Главного управления МЧС России по Республике Башкортостан (<https://02.mchs.gov.ru>) и Единой межведомственной информационно-статистической системы (<https://www.fedstat.ru>), находящиеся в открытом доступе.

При исследовании разрушительных сил ОПЯ необходимо иметь единую шкалу для измерения размеров природных катастроф, что позволит сравнивать степень опасности ожидаемых в регионе ОПЯ и сможет повысить эффективность планирования защитных мероприятий. Необходимо констатировать, что на данный момент такой единой шкалы для сравнения ОПЯ не разработано.

На практике для определения размеров природных катастроф используются два показателя:

- число летальных исходов за катастрофу C (единица измерения ЛИ),
- размер материального ущерба M (единица измерения рубли или дол. США).

Эти показатели имеют разную размерность, что затрудняет сравнение масштабов природных катастроф. Для преодоления данного препятствия размер катастроф следует считать векторной величиной (C, M) . Компоненты вектора удобно измерять в единой системе единиц, для этого необходимо показатели C и M во время катастрофы выразить в экономической мере. В этом случае необходимо принять, что один человек ежегодно производит материальных ценностей на сумму глобального валового или регио-

нального продукта на душу населения. За базисный период можно принять любой временной интервал (с конкретным экономическим обоснованием). В соответствии с методикой, предложенной в [15], в качестве базового был выбран период 2000–2010 гг., в который, по данным Росстата, значение ВРП Башкирии составляло 145 \$, и было максимальным по сравнению с предыдущим десятилетием. Величину материальных потерь K , которые понесет регион от гибели одного человека, можно получить следующим образом:

$$K = GDP \cdot ADWL, \quad (1)$$

где GDP – валовый внутренний/региональный продукт (Gross Domestic Product), $ADWL$ (Average Duration of Working Life) – условная средняя продолжительность трудовой жизни в Башкирии составляет 31 год.

С учетом этого можно получить единую оценку потерь в виде модуля вектора ($K \cdot C, M$), который вычисляется по формуле:

$$CLI_{\text{вект}} = [(K \cdot C)^2 + M^2]^{1/2}. \quad (2)$$

Учитывая, что величины C и M не могут быть отрицательными и изменяются в ограниченном диапазоне значений, можно вместо $CLI_{\text{вект}}$ (Catastrophe Loss Index) ввести величину, которая в дальнейшем будет именоваться приведенными потерями RCL (Reduced Catastrophe Loss) и вычисляется по формуле:

$$RCL = K \cdot C + M. \quad (3)$$

Масштабный коэффициент приведения числа погибших K в (3) имеет размерность дол. США/ЛИ.

С учетом того, что значения RCL изменяются в широком диапазоне, удобно от самой величины перейти к ее десятичному логарифму. Для этого следует выбрать определенный уровень потерь в качестве репера (отсчетного уровня), например, засуха на территории Башкирии в 2010 г., когда в результате природной стихии погибло 500 чел. Поэтому за единицу потерь примем значение CLI_0 , получающееся по формуле (2) при $C_0 = 500$ и $M = 0$. Затем в качестве индекса величины приведенных потерь при ОПЯ будет использоваться величина $RCLI$ (Reduced Catastrophe Loss Index), вычисляемая по формуле:

$$RCLI = \lg[C/C_0 + M/(K \cdot C_0)]. \quad (4)$$

Вычисленный таким образом индекс приведенных потерь $RCLI$ удобен применительно к анализу масштаба природных катастроф тем, что его значения варьируются в узком диапазоне. Значение индекса, равное нулю, эквивалентно $C = 500$ ЛИ, или материальным потерям $M = 22614500$ \$. Изменение этого индекса на единицу эквивалентно изменению значения потерь на порядок. Все сопутствующие вычислительные процедуры в формулах (1)–(4) были реализованы в Программном модуле для оценки социально-

экономических последствий от опасных природных процессов¹. Индекс приведенных потерь позволяет учесть как человеческие жертвы, так и материальные потери с учетом поправки на экономический уровень развития региона/страны, позволяет ранжировать ОПЯ. В последующем, при сравнении с альтернативными методиками, планируется провести оценку критерия оптимальности вводимого показателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проводя анализ полученных результатов, необходимо учитывать, что территория Башкирии вследствие своего физико-географического положения подвержена влиянию различных центров действия атмосферы [5–9], в основном это Исландский минимум и Азорский максимум. Холодные ветры, дующие с севера, и теплые воздушные массы Средней Азии способствуют возникновению таких опасных метеорологических явлений, как смерчи и ураганы [14, 17]. Уральские горы, являющиеся основным препятствием для циклонов, способствуют выпадению атмосферных осадков, главным образом, на западном склоне, и их аккумуляции в горнолесной зоне, что нередко приводит к катастрофическим наводнениям. Известно, что для территории Башкирии характерны широкое распространение и разнообразие карста [1]. Под термином карст понимают природные и техногенные процессы и созданные ими формы наземного и подземного рельефа. В Башкирском Предуралье и на западном склоне Южного Урала залегают карстующиеся карбонатные и сульфатные отложения, которые способствуют развитию опасных геологических процессов (образование воронок, оврагов, провалов, пещер и др.). На рис. 2 приведены результаты вычислений значений индекса приведенных потерь для территории Башкирии за 2012–2020 гг., очевидно, что лесные пожары, опасные метеорологические и гидрологические явления доминируют по своему воздействию в сравнении с опасными геологическими явлениями.

Для территории Башкирии характерен рост числа проявлений, количества жертв и материального ущерба от первых трех категорий ОПЯ, особенно за последние 4–5 лет. Для опасных геологических явлений (землетрясения, карстовые процессы) такая тенденция неочевидна, что может быть объяснено инерционными свойствами этих процессов. По сравнению с метеорологиче-

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021663027, РФ. Программный модуль для оценки социально-экономических последствий от опасных природных процессов / Д.Ю. Васильев, В.М. Картак, А.И. Денмухаммадиева, А.В. Мулина, В.А. Семенов, А.А. Чибилёв; правообладатель Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. № 2021662121; заявл. 30.07.2021; зарегистр. 11.08.2021. <https://cloud.mail.ru/public/si5N/LDPfR1WqD>.

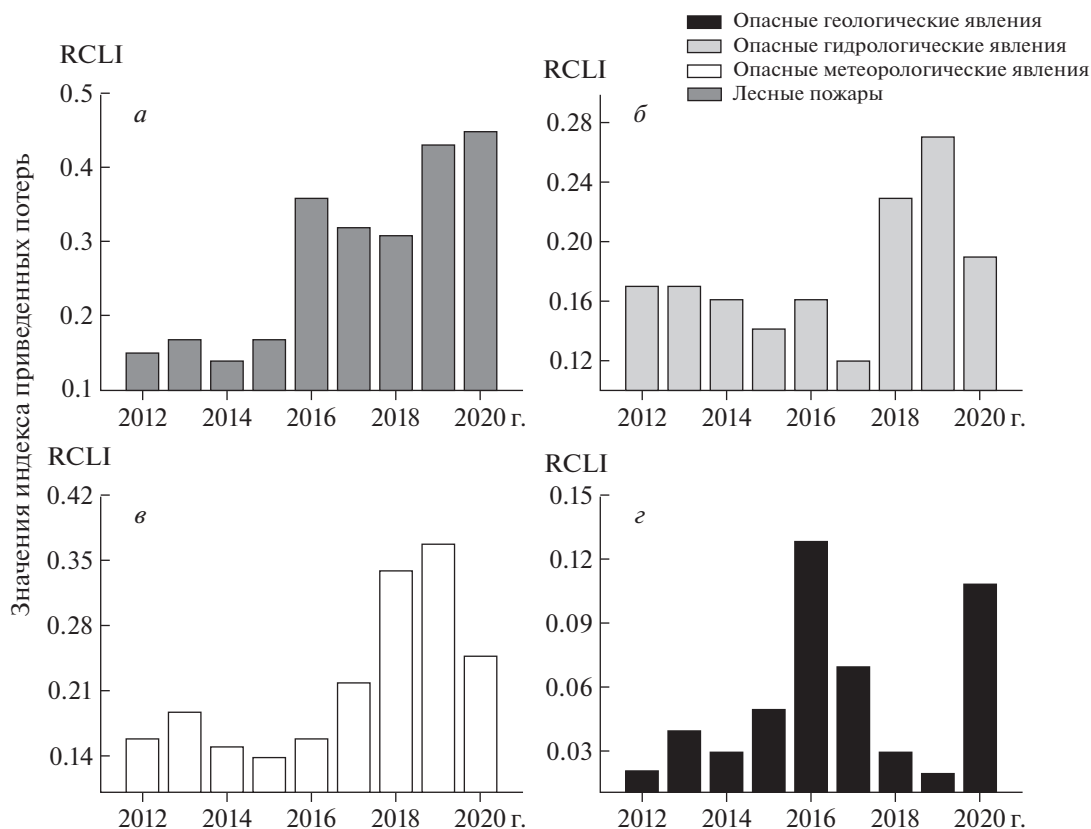


Рис. 2. Динамика индекса приведенных потерь за 2012–2020 гг. для территории Башкирии в целом.

скими и гидрологическими процессами, геологические процессы менее динамичны во времени.

Общие потери от ОПЯ (с учетом выброса загрязняющих веществ в атмосферу и водоемы) также растут, что наглядно продемонстрировано на рис. 3, как и для упомянутых трех категорий ОПЯ характерно резко увеличение ущерба за последние годы. По всей видимости, климатические изменения в регионе в дальнейшем будут

способствовать росту числа ОПЯ и, как следствие, увеличивать масштаб приносимого ущерба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим практическое значение индекса и самого метода индексации. Переход от модуля оценки $CLI_{\text{вект}}$ к оценке RCL не искажает порядка расположения ОПЯ по величине выбранного критерия, между обеими величинами существует сильная теснота связи (значение коэффициента линейной корреляции Пирсона $r = 0.99$).

Величину RCL можно рассчитывать без потери корректности оценки, которая позволяет дифференцировать ОПЯ по характеру преобладающих потерь, так в результате лесных пожаров число жертв среди населения было меньшим по сравнению с наводнениями, а материальный ущерб большим.

Индекс приведенных потерь, учитывающий человеческие жертвы и материальные потери с учетом поправки на экономический уровень региона, позволяет ранжировать ОПЯ.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР “Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем” (№ АААА-А21-121011190016-1), при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776, анализ фи-

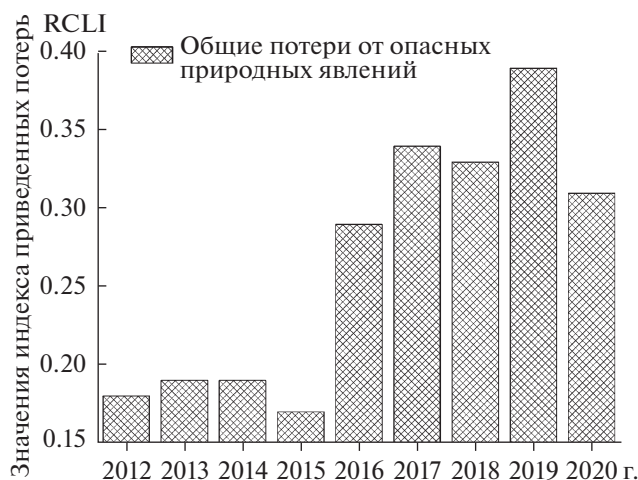


Рис. 3. Динамика общих потерь за 2012–2020 гг. для территории Башкирии в целом.

зических рисков ОПЯ выполнен при поддержке РНФ (проект 19-17-00242).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г., Рожественский А.П. и др. Карст Башкортостана. Уфа: Изд-во УНЦ РАН, 2002. 383 с.
2. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Комарова Н.Ю. Региональная неоднородность климатических изменений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 1. Вып. 5. С. 410–418.
3. Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Корнева И.А. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29–45.
4. Бебрицкий А.И., Коршунов А.А., Шаймарданов М.З. Влияние опасных гидрометеорологических явлений на устойчивое развитие экономики России // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 59–67.
5. Васильев Д.Ю., Лукманов Р.Л., Ферапонтов Ю.И., Чувывров А.Н. Цикличность гидрометеорологических характеристик на примере Башкирии // Доклады Академии наук. 2012. Т. 447. № 3. С. 331–334.
6. Васильев Д.Ю., Гавра Н.К., Кочеткова Е.С., Ферапонтов Ю.И. Корреляции сумм атмосферных осадков со средними и максимальными расходами воды весеннего половодья в бассейне реки Белая // Метеорология и гидрология. 2013. № 5. С. 79–90.
7. Васильев Д.Ю., Ферапонтов Ю.И. Тренды в колебаниях приземной температуры воздуха на примере Башкирии // Известия РАН. Сер. географическая. 2015. № 1. С. 77–86.
8. Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Зайцева Г.С., Закирзянов Ш.И. и др. Модель долгосрочного прогноза весеннего стока на примере бассейна реки Белая // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 6. С. 723–726.
9. Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Семенов В.А., Чибилев А.А. Оценка тенденций изменения засушливости для территории Южного Урала в период 1960–2019 гг. с использованием различных методов // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 494. № 1. С. 91–96.
10. Голицын Г.С., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 9–12.
11. Кондратьев К.Я. Глобальные изменения климата: данные наблюдений и результаты численного моделирования // Исследование Земли из космоса. 2004. № 2. С. 61–96.
12. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
13. Мохов И.И., Семенов В.А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
14. Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я. и др. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчопасной ситуации // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 30–40.
15. Русин И.Н. Стихийные бедствия и возможности их прогноза. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2003. 140 с.
16. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 21–33.
17. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Захарченко Д.И., Мохов И.И. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 года // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 29–37.
18. Kreimer A. Social and economic impacts of natural disasters // Int. Geology Review. 2001. V. 43. P. 401–405. <https://doi.org/10.1080/00206810109465021>
19. Lucas E.W., Sousa F.A., Silva F.D., Rocha R.L., et al. Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin Brazilian Amazon // Weather and Climate Extremes. 2021. V. 31. 100306. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>
20. McLennan J., Every D., Reynolds A. Disability and natural hazards emergency preparedness in an Australian sample // Natural Hazards. 2021. V. 107. P. 1489–1499. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04642-8>
21. Tabari H. Extreme value analysis dilemma for climate change impact assessment on global flood and extreme precipitation // Journal of Hydrology. 2021. V. 593. 125932. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125932>
22. Sorte F.A., Johnstone A., Ault T.R. Global trends in the frequency and duration of temperature extremes // Climatic Changes. 2021. V. 166. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03094-0>

ASSESSING THE SOCIAL AND ECONOMIC IMPACTS OF NATURAL HAZARDS WITH BASHKIRIA AS A CASE STUDY

D. Yu. Vasil'ev^{a,b,c,#}, Yu. G. Voronova^a, S. V. Novikov^a, V. A. Semenov^c, and A. A. Chibilev^b

^a Ufa State Aviation Technological University, ul. K. Marksa, 12, Ufa, 450008 Russia

^b Institute of Steppe, the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Pionerskaya, 11, Orenburg, 460000 Russia

^c A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Science, Pyzhevskii per., 3, Moscow, 119017 Russia

[#]E-mail: vasil'ev.dyu@ugatu.ru

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

The methodological aspects of analyzing the impact of hazardous natural phenomena, including ranking and determination of general characteristics, are considered in this Bashkiria case study. Using the statistical data

on natural hazards and the number of deaths and economic damage, the reduced loss index for 2012–2020 was calculated. Using the reduced catastrophe loss index RCLI, comparative assessments of natural hazards were made for the territory of Bashkiria. Proceeding from the operational data by the The State Committee of the Republic of Bashkortostan for Emergency Situations, the territory of the Republic was mapped and the areas exposed to the greatest impact of hazardous natural disasters were identified. An increase in the amount of natural hazards and material damage has been noted in recent years in the Bashkiria territory.

Keywords: natural disasters, social and economic impacts, temperature extremes, tornadoes, hurricanes, river floods, forest fires, reduced catastrophe loss index, Bashkiria

REFERENCES

1. Abdrakhmanov, R.F., Martin, V.I., Popov, V.G., Rozhdestvenskii, A.P. et al. *Karst Bashkortostana* [Karst of Bashkortostan]. Ufa, USC RAS Publ., 2002, 383 p. (in Russian)
2. Astafeva, N.M., Raev, M.D., Komarova, N.Yu. *Regionalnaya neodnorodnost' klimaticheskikh izmenenii* [Spatial heterogeneity of climate variation]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 410–418. (in Russian)
3. Bardin, M.Yu., Ran'kova, E.Ya., Platova, T.V., Samokhina, O.F., Korneva, I.A. *Sovremennye izmeneniya prizemnogo klimata po rezul'tatam regul'yarnogo monitoringa* [Modern surface climate change according to routine climate monitoring data]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020, vol. 45, no. 5, pp. 317–329. (in Russian)
4. Bedritskii, A.I., Korshunov, A.A., Shaimardanov, M.Z. *Vliyaniye opasnykh gidrometeorologicheskikh yavlenii na ustoichivoe razvitiye ekonomiki Rossii* [Impact of hydrometeorological disasters on sustainable development of Russian economy]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2017, no. 7, pp. 59–67. (in Russian)
5. Vasil'ev, D.Yu., Lukmanov, R.L., Ferapontov, Yu.I., Chuvyrov, A.N. Periodicity in the hydrometeorological parameters of Bashkiria. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 448, no. 1, pp. 131–134. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12110165>
6. Vasil'ev, D.Yu., Gavra, N.K., Kochetkova, E.S., Ferapontov, Yu.I. Correlation between the total precipitation and the mean and maximum runoff during the snowmelt flood in the Belaya River basin. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, vol. 38, no. 5, pp. 351–358. <https://doi.org/10.3103/S1068373913050087>
7. Vasil'ev, D.Yu., Ferapontov, Yu.I. *Trendy v kolebaniyakh prizemnoi temperatury vozdukh na pimere Bashkirii* [Trends in the fluctuations of near-surface air temperature by the example of Bashkiria]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2015, no. 1, pp. 77–86. (in Russian)
8. Vasil'ev, D.Yu., Vodopyanov, V.V., Zaitseva, G.S., Zakirzyanov, Sh.I., et al. Model of long-term forecast of spring runoff on the example of the Belaya River basin. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, part 2, pp. 724–727. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19060345>
9. Vasil'ev, D.Yu., Vodopyanov, V.V., Semenov, V.A., Chibilev, A.A. Analysis of trends in aridity changes for Southern Ural region over the period 1960–2019 using various methods. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 494, part 1, pp. 748–752. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20090214>
10. Golitsyn, G.S., Vasil'ev, A.A. *Izmeneniye klimata i ego vliyaniye na chastotu gidrometeorologicheskikh yavlenii* [Climate change and its impact on the frequency of extreme hydrometeorological events]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, no. 11, pp. 9–12. (in Russian)
11. Kondrat'ev, K.Ya. *Global'nye izmeneniya klimata: daniye nablyudeniya i rezul'taty chislennogo modelirovaniya* [Global climate change: observation data and simulation modeling results]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2004, no. 2, pp. 61–69. (in Russian)
12. Mokhov, I.I., Eliseev, A.N., Gur'yanov, V.V. Model estimates of global and regional changes in the Holocene. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 490, no. 1, pp. 23–27.
13. Mokhov, I.I., Semenov V.A. Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 84–92. <https://doi.org/10.3103/S1068373916020023>
14. Novitskii, M.A., Shmerlin, B.Ya., Petrichenko, S.A., Tereb, L.A. et al. The tornado in Bashkortostan: the potential of analyzing and forecasting tornado-risk condition. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, no. 10, pp. 683–690.
15. Rusin, I.N. *Stikhiinye bedstviya i vozmozhnosti ikh prognoza* [Natural disasters and outlooks for their forecasting]. St. Petersburg, RSHU Publ., 2003. 140 p. (in Russian)
16. Semenov, V.A. *Sovremennye issledovaniya klimata Arktiki: progress, smena kontseptsii, aktual'nye zadachi* [Modern studies of the Arctic climate: progress, change of concept, problems and solve]. *Izvestia RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 57, no. 1, pp. 21–33. (in Russian)
17. Chernokulsky, A.V., Kurgansky, M.N., Mokhov, I.I., Zakharchenko, D.I. Genesis environments and characteristics of the severe tornado in the Southern Urals on August 29, 2014. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, vol. 40, no. 12, pp. 794–799.
18. Kreimer, A. Social and economic impacts of natural disasters. *Int. Geology Review*, 2001, vol. 43, no. 5, pp. 401–405. <https://doi.org/10.1080/00206810109465021>
19. Lucas, E.W., Sousa, F.A., Silva, F.D., Rocha, R.L., Pinto, D.D., Silva, V.P. Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin Brazilian Amazon. *Weather and Climate Extremes*, 2021, vol. 31, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>
20. McLennan, J., Every, D., Reynolds, A. Disability and natural hazards emergency preparedness in an Australian sample. *Natural Hazards*, 2021, vol. 107, pp. 1489–1499. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04642-8>
21. Sorte, F.A., Johnstone, A., Ault, T.R. Global trends in the frequency and duration of temperature extremes. *Climatic Changes*, 2021, vol. 166. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03094-0>
22. Tabari, H. Extreme value analysis dilemma for climate change impact assessment on global flood and extreme precipitation. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 593, 125932. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125932>

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 165.0

**НАУКА “ГЕОЭКОЛОГИЯ” КАК ПРИМЕР ИМИТАЦИИ
ЭПИСТЕМОЛОГИЧЕСКОГО ЕДИНСТВА ПРИ РАСХОЖДЕНИИ:
ОБЪЕКТОВ, СУБЪЕКТОВ, ПРОБЛЕМ**© 2022 г. И. Н. Заиканова^{1,*}¹ *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия***E-mail: izaikanova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 20.04.2022 г.

В настоящее время в научной литературе одновременно существуют две области знаний, т.е. две науки о природе, носящие одно и то же название — “геоэкология”. Исходным пунктом критерия научности выступает тезис неправомерности сведения одних наук к другим или их противопоставление. Одновременное существование двух наук с одинаковым названием противоречит логике, в частности Закону тождества Аристотеля. Появление термина “геоэкология” географами приписывается Карлу Троллию — географу, чьи основные научные труды посвящены изучению рельефа, климата, растительности, а также проблем экологии ландшафтов. Название “геоэкология” в геологическом понимании входит в название Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, нескольких кафедр на геологических факультетах в ВУЗах РФ, а также журнала “Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология”. Некритичность в отношении сложившегося принципа познания, когда разными специалистами рассматриваются разные объекты и решаются разные, не сводимые вместе задачи под одним названием, — противоречит основам научной логики. Нерешенность проблемы существования двух “геоэкологий” вызвало появление очень большого количества статей и книг, исключающих единство мнений и внутренней логики, что неудивительно, поскольку критерии науки “геоэкология” выводились из опыта и теорий специалистов совершенно разных наук. Автор статьи, используя методы эпистемологии, показывает, что все основополагающие критерии логики науки: объект, субъект и проблема, в двух “геоэкологиях” различны, и предлагает для них названия, не противоречащие сущности, как геологии, так и географии.

Ключевые слова: *геоэкология, эпистемология, логика науки, объект, субъект, проблемы*

DOI: 10.31857/S0869780922040087

ВВЕДЕНИЕ

Отношение “человек — окружающий его мир” весьма сложно и многосторонне. Пришел конец философии, которая черпает свое знание о всеобщих принципах бытия, минуя данные наук о природе [23]. Если философия считает нужным обратиться к естественным наукам, высоко оценивая их важность для нее, то так ли ценятся в науках о Земле философские категории познания, знания и науки? В настоящей статье предлагается, используя аппарат доказательства и оценок эпистемологии¹, **практически** решить проблему, которая пока не находит своего герменевтического ре-

шения в рамках двух ключевых наук, конкурирующих в вопросе первенства и приоритетов на номен производных от них знаний. Побудительным мотивом написания данной статьи является то, что в настоящее время в научной литературе одновременно сосуществуют две области знаний, т.е. практически две науки (об этом подробно будет сказано ниже), носящие одно и то же название — “геоэкология”. Необходимость прийти к какому-то выводу по этому поводу подсказывает нам утверждение В.В. Ильина “множество реалий, скрывающихся за словом, является открытым классом, ... условия истинности значений и оценок утверждений зависят не от синтаксических, а от субстанциональных пресуппозиций, т.е. факторов экстралингвистического характера” [20], к которым мы и обратимся. Основой для нашего опыта является утверждение, что “эпистемология в широком понимании — это критика того, что считается знанием в обыденном здоровом

¹ Эпистемология — философско-методологическая дисциплина, исследующая знание как таковое, его строение, структуру, функционирование и развитие. Нередко слово выступает как синоним гносеологии. Гносеология — философская дисциплина, занимающаяся исследованиями, критикой и теориями познания.

смысле, в имеющейся в данное время науке”². Уже Платон приходит к выводу о том, что знание предполагает не только соответствие содержания высказывания и реальности, но и обоснованность первого [34]. Наименование науки будет проверено ниже путем критического анализа соответствия ее содержанию.

Наука – прикладная логика, ибо она создает средства движения знания к новым результатам [23, 28]. Одновременное существование двух наук с одинаковым названием “геоэкология” противоречит критериям логики, в частности Закону тождества Аристотеля, который гласит: “...*Иметь не одно значение – значит не иметь ни одного значения; если же у слов нет (определенных) значений, тогда утрачена всякая возможность рассуждать друг с другом, а в действительности – и с самим собой; ибо невозможно ничего мыслить, если не мыслить (каждый раз) что-нибудь одно*” [1]. Из последнего вытекают определенные требования к науке, формулируемые в логике как логические нормы, правила, необходимые для соблюдения правильности мыслительного процесса. Их можно свести к следующим двум:

1. Каждое понятие (суждение) должно употребляться в одном и том же определенном смысле и сохранять его в процессе всего рассуждения.

2. Нельзя отождествлять различные мысли и нельзя тождественные мысли принимать за различные.

Когда эти требования нарушаются, то возникают многочисленные логические ошибки (называемые по-разному: “смешение понятий”, “подмена тезиса” и т.д.), рождающие неопределенность, хаотичность, бессмыслицу в мышлении. Именно это и происходит, когда под одним и тем же названием, обозначающим науку “геоэкологию”, скрываются различные объекты и субъекты исследования.

Сформулировавший основные законы логики Аристотель также утверждал: “*Невозможно, чтобы одно и то же в одно и то же время было и не было присуще одному и тому же в одном и том же отношении*”. Нарушение этого закона тривиализирует системы знания, обрекает их на бессмысленность. Противоречивые системы, как правило, лишены познавательной (эвристической) ценности [2].

Современная наука эпистемология, которая занимается философией познания на основе воззрений Платона и Аристотеля, а позднее, в единстве с теорией познания, становится важнейшей областью философского исследования в работах Бэкона, Декарта, Лейбница, Д’Аламбера, Дидро, Канта, Фихте, Гегеля и др., в том числе современных философов, дает достаточно ясные критерии

определения науки и логики ее развития. К логическим критериям научности относятся непротиворечивость, полнота, независимость, стройность, внутренняя организация и т.п. При этом исходным пунктом критерия научности выступает тезис неправомерности сведения одних наук к другим или их противопоставление. А в роли эмпирических критериев научности, кроме процедуры эмпирического подтверждения (верификации), на равных правах выступают и опровержения (фальсификации), что ясно и кратко выразил В.В. Ильин “*Впечатления нарочитости преодолеваются критикой*” [23].

Появление термина “геоэкология” географами приписывается Карлу Троллю, профессору Берлинского (с 1930 г.) и Боннского (с 1938 г.) университетов, директору Географического института Боннского университета (с 1938 г.) и пр. К. Тролля специализировался на воздушной географической разведке и ландшафтно-экологическом дешифрировании аэрофотоснимков. Основные научные труды его посвящены изучению рельефа, климата, растительности, их взаимосвязей, особенно в тропических странах, а также проблемам экологии ландшафтов, что ясно говорит о том, что он был географом, который еще в 1930-х годах понимал под геоэкологией одну из ветвей естествознания, объединяющую экологические и географические исследования в изучении экосистем. Наиболее подробно вклад К. Тролля в развитие ландшафтной экологии (геоэкологии) подчеркнул К.К. Марков в своей статье “К. Тролля и современная география” [26]. То же название науки – “геоэкология”, но уже в качестве геологической (инженерно-геологической) встречаем мы и в трудах геологов, начиная с середины прошлого века [5, 6, 12, 18, 19, 21, 32, 38]. По мнению В.Т. Трофимова, в отечественную науку данный термин был введен географом В.Б. Сочаевой, который определил ее как науку о состоянии геологической среды и всех ее компонентов, о происходящих в ней процессах, активизация которых может отражаться и на всех геосферах Земли. В таком понимании содержание геоэкологии, по существу, представляет собой новую геологическую науку [39]. По мнению В.И. Осипова, “*геоэкология – это наука, изучающая геосферные оболочки Земли как компоненты окружающей среды и минеральную основу биосферы, и происходящие в них изменения под влиянием природных и техногенных факторов, а также неорганическое вещество биосферы и происходящие в нем изменения. Живое вещество (в том числе и человек) не является объектом ее исследования*” [31]. Данный подход построен на понимании главенствующей роли геологической среды в устройстве мироздания.

Поскольку нашей задачей является либо провести границу между географическим и геологическим пониманием “геоэкологии”, либо обос-

² https://epistemology_of_science.academic.ru/

новать ее единство, обратимся сначала к рассмотрению элементарных, основополагающих категорий философии познания – объектов и субъектов этих наук.

ОБЪЕКТЫ И СУБЪЕКТЫ ДВУХ “ГЕОЭКОЛОГИЙ”

Остановимся на утверждении Аристотеля, что существование предмета (объекта) предшествует существованию науки. Научное сообщество исторически развивается, организуясь в различные социальные и профессиональные формы. Такие формы многообразны: академии, университеты, лаборатории, исследовательские институты и т.д. Чтобы доказать обоснованность необходимости разделения употребляемого названия “геоэкология” на две отрасли наук, обратимся к исходным, прототипическим наукам, какими являются в данном случае геология и география. Если перечислять все объекты географического познания Земли, то их неполный список включает (для этого мы перечислим основные факультеты географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова): физическую географию, геоморфологию, океанографию, метеорологию, почвоведение и геохимию ландшафтов, биогеографию, экономическую географию России, мировое хозяйство, гидрологию, метеорологию, социальную и экономическую географию зарубежных стран, рекреационную географию и туризм, ландшафтоведение и др.

Важно отметить, что название “геоэкология” входит и в наименование кафедры “физическая география мира и геоэкология” географического факультета МГУ, кроме того часто употребляется географами в научных публикациях [4, 10, 13, 18, 24, 25, 30, 35, 40].

Из анализа этих и других трудов географов следует, что геоэкология – комплексная наука на стыке экологии природной среды и географии. Однако четкого и общепринятого определения этот термин до сих пор не получил. Предмет и задачи геоэкологии географами также формулируются по-разному, зачастую весьма разнородно [8, 13, 17, 25]. Практически, в самом общем случае, они сводятся в основном к изучению негативных антропогенных воздействий на географическую оболочку Земли.

Если обратиться к объектам исследования геологии, то следуя той же логике, также покажем их на примере структуры (кафедр) геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова: динамическая геология, геология, геохимия и экономика полезных ископаемых, региональная геология и история Земли, теоретические основы разработки месторождений нефти и газа, нефтегазовая седиментология и морская геология, палеонтоло-

гия, геохимия, кристаллография и кристаллохимия, петрология и вулканология, минералогия, геофизические методы исследования земной коры, сейсмометрия и геоакустика, гидрогеология, геокриология, инженерная и экологическая геология.

Но если кратко обозначить определение мета-науки геологии, то оно сводится к следующему: совокупность наук о строении Земли, ее происхождении и развитии, основанных на изучении геологических процессов, вещественного состава, структуры земной коры и литосферы всеми доступными методами с привлечением данных других наук и дисциплин. Коротко геологию можно определить как науку о составе, строении и закономерностях развития Земли и изучение ее поверхности.

Определение географической оболочки, являющейся объектом изучения *географии*, формулируется следующим образом: комплексная внешняя географическая оболочка Земли (объединение поверхностных геосфер), охватывающая нижние слои атмосферы, *верхние толщи земной коры*, гидросферу и биосферу. Объект географии определяется и иначе – это круговорот различных форм существования материи, но только одна его сторона есть предмет познания географии: процесс наземных взаимных пространственных отношений элементов данного круговорота (материальных тел и явлений) и пространственные закономерности как результат этого процесса *в пределах географической оболочки* [3].

Здесь разумно особо остановиться на том, что являются собой эти “верхние толщи литосферы” – казалось бы, общий объект для специалистов названных выше наук. Для географа данный слой очень важен – это почва, которая имеет весьма сложное строение, генезис и зональность, причем В.В. Докучаев ее называл “зеркалом ландшафта”, а В.О. Таргульян – “памятью ландшафта”. Формируясь на материнской породе и включая подстилающую, почва имеет мощность от первых сантиметров до порядка 1.5–2 м.

Для геологов именно эта мощность пород не представляет, как правило, интереса, в буровых журналах, причем, крайне редко при описании верхнего слоя, по сути, являющегося почвой, упомянуто, что он включает растительные остатки, всегда называется только его механический состав, реже цвет. Действительно, даже при минимальном бурении 10–20 м он для инженера-геолога практически ничего не значит, не говоря уже о глубоком и сверхглубоком бурении, исчисляемом в тысячах метров. Геоморфология, предметом которой является рельеф поверхности Земли, только косвенно касается состава пород, поскольку он, кроме большого количества внешних факторов, может оказывать влияние на его

формирование, хотя предметом специального изучения не является. В ландшафтоведении принято понятие – литогенная основа ландшафта, под которой понимается приповерхностная часть земной коры, находящаяся в пределах зоны выветривания (преобразования горных пород под воздействием самого ландшафта). Литогенная основа – горные породы и рельеф дневной поверхности, слагаемый ими.

Мы не напрасно привели список названий кафедр двух факультетов, но, чтобы показать внутреннюю целостность каждого из двух научных направлений протонаук “геоэкологии”, а также существенные различия в объектах их исследования и, безусловно, в субъектах. Объект научной деятельности становится таковым лишь вследствие активной материально-практической и теоретической деятельности исследователя – субъекта науки. Каждая из названных выше специальностей проявляет себя в профессии, аттестуемой в дипломах, а значит, создает коллективы специалистов, совместно идущих в одном направлении изучения отраслей геологии и географии.

Научное познание, возникшее на определенном историческом этапе, осуществляется его отдельными представителями, которые в своей совокупности образуют научное сообщество, организованное по отношению, как мы отмечали выше, к определенному “предмету науки”, т.е. в данном конкретном случае либо к географии, либо к геологии. В европейской философской традиции проблема субъекта представлена в гносеологическом ключе, так как субъектность связывалась с познанием. С этой точки зрения важно подчеркнуть, что субъект познания является общественно-историческим явлением, реализующим общественные цели и осуществляющим познавательную деятельность на основе исторически развивающихся методов научного исследования. Эти цели перед научным познанием формулирует общество в виде как социально-экономических, так и технических проблем. Выделение объекта и субъекта познания помогает лучше понять специфические особенности различных, в частности, географической и геологической концепций достоверного познания мира, что очевидно показано выше.

“ГЕОЭКОЛОГИЯ” КАК НАУКА

Поскольку цель нашего исследования – определить правомерность применения термина “геоэкология” в отношении к названным протонаукам, обратимся к тому, как определял науку Аристотель, наделавший ее тремя основными чертами: 1) доказательностью – всеобщностью и необходимостью; 2) способностью объяснения; 3) сочетанием единства и наличием степеней подчинения.

В отношении доказательности Аристотель пишет, что наука есть вид бытия, способный доказывать. Причем доказательство невозможно ни о случайном бытии, ни о том, что возникает и разрушается, но только об общем. Научное знание об общем налицо, если мы знаем суть бытия вещи (объекта науки – И.З.)³. Как *всеобщность* – географической оболочки, с одной стороны, так и *необходимость* экологического подхода к их изучению, не вызывают сомнения, но именно как двух самостоятельных объектов.

В понимании Аристотеля “способность объяснения” обуславливает объяснительный характер знания. И это качество обеих “геоэкологий” не подлежит сомнению, поскольку определяется различными аналитическими, методическими и др. подходами двух наук и теми знаниями об объектах, которые получили представители (субъекты) этих протонаук.

Действительно, специалист с географической подготовкой, например, не сможет так оценить и исследовать всю совокупность физико-механических свойств пород, возможность их использования, нейтрализации негативных свойств грунтов и т.д. для конкретного вида строительства или разработки месторождений, как этому обучен геолог. И, наоборот, геолог с геологическим образованием не сможет оценить воздействие хозяйственной деятельности на деградацию почв, состояние растительного покрова, загрязнение рек и воздушного бассейна, как это может сделать географ.

Третья черта науки – это сочетание единства с наличием степеней подчинения. В нашем случае уже доказанного внутреннего единства двух “ключевых” наук, основанного на совокупности включенных в них составляющих, но никак не двух независимо развивающихся “геоэкологий”.

Именно эта последняя черта науки, отмеченная Аристотелем, доказывает, что “геоэкология” в том виде, в каком она представлена в научных публикациях, в системе таких знаний, как геология и география, имеет принципиально различную подчиненность.

ПРОБЛЕМЫ ДВУХ НАУК

В.И. Вернадский писал: “*Вся часть научного творчества, связанная с постройкой научных космогоний и научных гипотез, находится в теснейшей связи с философской мыслью. В ней неизбежен, для нее необходим философский анализ основных научных положений*” [7]. Если обратиться опять к истокам учения о познании мира, то по мнению еще

³ http://lib.ru/POEEAST/ARISTOTEL/metaphiz.txt_with-big-pictures.html

древних философов, кроме объекта и субъекта, оно определялось еще и также наличием **проблемы**, возникшей в определенных исторических, социальных и экономических условиях и послужившей причиной возникновения науки или научной теории.

Теоретик науки уже новейшего времени К. Поппер писал: “*Мой тезис состоит в том, что любое новое продвижение в науке может быть принято только исходя из того, что его исходной точкой является проблема или проблемная ситуация...*” [33].

Анализ проблем двух геоэкологий показывает, прежде всего, их глубинное различие. Так, проблема геоэкологии, с позиций геологической науки, связана изначально со строительством, для которого геологические условия являлись со времени появления первых сооружений, дорог, мостов и т.д. главной исходной информацией. Важно отметить, что эта наука не сводится только к инженерной геологии (грунтоведению, геодинамике и т.д.), но включает и гидрогеологию, а в зоне многолетнемерзлых пород, и криогенные особенности пород зоны хозяйственного воздействия. Иными словами, проблема, которая стоит в настоящее время перед этой наукой, — обеспечение проектирования, строительства и безаварийной эксплуатации сооружений, их совокупности, т.е. промышленных комплексов, городов, городских агломераций, линейных, подземных сооружений и т.д., включая очень важный аспект — разработку нормативных документов в части освоения и охраны геологической среды. Это выражается в создании сектора науки, непосредственно замкнутого на потребности практики [5, 18, 21 и др.].

Что касается геоэкологии в понимании географов, то наиболее кратко и точно ее определил и назвал проблему С.П. Горшков: “*геоэкология — это наука о природной среде в связи с ее антропогенными изменениями*” или “*область знания, призванная обеспечить выживание человечества*”. Понятно, что речь не идет о технической стороне этой проблемы, а только об описательной и рекомендательной [9, 22, 30 и др.].

Рассмотрим это различие на примере такого приложения знаний (проблем) геологического геоэколога, как государственная (или региональная) экологическая экспертиза проектов, прописанная в природоохранных законах РФ. В этих экспертизах специальной и обязательной частью (одной из самых существенных в экспертизе) является оценка состояния геологической среды, ее компонентов и действующих экзогенных геологических процессов, возможного воздействия на нее намечаемой деятельности, (соответствия последней действующим строительным нормам), мероприятий по нейтрализации негативных про-

цессов, физико-механических свойств грунтов, моделирование гидрогеологических условий, мониторинг геологической среды во всех ее компонентах и др., которая делается на основе инженерно-геологических изысканий, прописанных как обязательная часть проектов в законодательстве, т.е. такой круг специфических задач, который никак не может решить географ при всей широте его образования.

“ГЕОЭКОЛОГИЯ” КАК ПРИМЕР ЭПИСТЕМИЧЕСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ

Надо заметить, что в настоящее время паритет наличия двух наук под одним названием признан как наименьшее зло, позволяющее относительно мирно сосуществовать кафедрам, институтам, журналам и т.д. Как толерантно заметил С.П. Горшков в своей монографии “*Концептуальные основы геоэкологии*” [13]: “*...смысл слова “геоэкология” все еще трактуется по-разному*”. Представляется, что причиной этому является нежелание привлечь к анализу основные критерии эпистемологии, которые позволяют логично обосновать специфичность, изолированность и самостоятельность двух “геоэкологий”. “Задачей как анализа, так и синтеза служит воспроизведение в мышлении предмета (объекта) согласно природе и законам самого объективного мира. Если мышление отойдет от объективных законов и будет производить анализ и синтез согласно законам, чуждым природе самого предмета (выделит элементы, которых нет в предмете, и **соединит то, что в материальном мире разъединено**) (курсив мой — И.З.), то оно уйдет от объективной истины в область умозрительных конструкций, создания произвольных построений” [23], что мы и имеем в научной литературе в отношении термина “геоэкология”.

В логико-методологической концепции К. Поппера, который внес большой вклад в разработку современных принципов научного познания, особое место занимает “принцип фальсификации”. Философ считает, что “*проверка решения требует проявления критичности мышления, умения не принимать на веру свои и чужие мысли, а подвергать их критическому рассмотрению, взвешивать все доводы*”. Позиция К. Поппера — это пример философии научного реализма. Приводимые им доводы могут быть отнесены и к рассматриваемой теме. Некритичность в отношении сложившегося принципа познания, когда разными специалистами рассматриваются разные объекты и решаются разные, не сводимые вместе задачи, под одним, общим названием, противоречит основам научной логики. Нерешенность проблемы двух “геоэкологий” вызвала появление очень большого количества статей и книг, (отраженного в списке литературы лишь кратко), отка-

зывают себе в единстве мнений, внутренней логики и методологии, что неудивительно, поскольку критерии науки “геоэкологии” вывелись из опыта и теорий специалистов, как доказано выше, формально разных наук. Из приведенного списка научных трудов по “геоэкологии” видно, что составляющие ее две науки *фактически разведены*, просто исходя из их названия.

Согласно К. Попперу, научное знание формируется не из-за появления новых обоснований, а из-за критики гипотез, которые предлагаются для решения новых проблем. В этом и состоит цель настоящей работы. Предлагаемое нами критическое рассмотрение опыта применения термина в публикациях позволяет говорить об обоснованности уже существующего разделения “геоэкологии” на две науки под разными названиями. Например, геоэкологии географической – как ландшафтной экологии (этот термин предлагал еще К. Тролль), экографии [29] или эколого-географические аспекты природопользования [40]; а геологической – как геоэкологии (или экологической геологии), исключило бы многочисленные неудачные попытки обосновать единство не единого, а также значительно облегчило преподавательский процесс, освоение знаний в каждой из отраслей [11, 14–16, 36 и др.].

Такое разделение избавило бы читателей от путаницы, а также возможности “*многообразных нестандартных когеренций, коннотаций, метафор, аллюзий*” [20] и других следствий, которые вытекают из нарушения закона тождества Аристотеля. Такой подход ничему не противоречит, а наоборот, снимает сложности ориентирования в литературе как географам, так и геологам, в том числе начинающим свою научную деятельность, где несовместимо с требованиями научной логики, безраздельно и безгранично упоминается пока один общий спорный [13] термин “геоэкология”, хотя даже на международном уровне такое разделение ясно обозначилось появлением IALE (The International Association for Landscape Ecology⁴) и успешным функционированием также и в нашей стране ее отделением IALE-RU.

Почему важно это разделение? Язык, формулирование проблем, появление новых терминов, взаимная критика в процессе дискуссии, а также свойство системности научного знания, когда теории и гипотезы поддерживают друг друга – все это является необходимыми условиями роста науки. Иначе каждая из названных выше наук принимает черты псевдонауки, имеющей специфические когнитивные признаки: неопределенную, размытую область применения, безграничную фактическую базу, самопротиворечивость и др. Самыми важными свойствами научного языка

являются его дескриптивная и аргументационная функции. *Лишь в границах языка, приведенного в логическую систему, становится возможным существование критического рассуждения и знания в объективном смысле* [33].

Иными словами, засвидетельствованная выше эпистемическая несправедливость, которая в философии обозначает необоснованное использование под одним номеном двух разных наук, тормозит их развитие в практическом, образовательном и в теоретическом аспектах.

Естественно, что разделение одной, имитирующей свое единство “геоэкологии” на две науки предполагается “пунктирным”, что обосновано, с одной стороны, столь широко распространенным в научном знании явлением, как смежные науки; с другой стороны, существующими даже между двумя “геоэкологиями” таких общих предметов исследования географии и геологии, как геоботаническая индикация экзогенных геологических процессов, как использующая математический аппарат географии – оценка безопасности геоэкологических условий территорий разного таксономического ранга, как совместное участие географов и геологов в разработке геоэкологических разделов Схем территориального планирования субъектов Российской Федерации и др.

ЛАНДШАФТНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Нами проведено небольшое расследование по части первенства упоминания К. Троллем такого двойственного термина “геоэкология”. Основные научные труды К. Тролля посвящены изучению рельефа, климата, растительности, их взаимосвязей, особенно в тропических и горных странах, а также проблемам экологии ландшафтов, что ясно говорит о том, что он был выдающимся географом, который еще в 1930-х годах развивал науку, объединяющую экологические и географические исследования в изучении экосистем и названную им *ландшафтная экология*. И это верно. Однако переходящее из книги в книгу и из статьи в статью номинирование К. Тролля в качестве основоположника “геоэкологии”, как следует из изучения работ самого автора, оказалось весьма сомнительным, хотя оно очень многими авторами упоминается как решающий фактор исключительно географического понимания этого термина.

Заметим, что с позиций эпистемологии и философии данный аргумент не может рассматриваться в качестве решающего, скорее его можно определить как *прагматизм*, т.е. ошибочную эпистемологию, которая подчеркивает превалирующую роль *действия* в познании. Это предполагает более эмпирический подход к предмету в целом,

⁴ Международная Ассоциация Ландшафтной Экологии.

оставляя позади философские определения и аргументы в пользу логики, а вместо этого используя психологические методы для понимания того, как “знание” на самом деле формируется и используется в естественном мире.⁵

В книгах и статьях, посвященных геоэкологии, обычно мы читаем: «*Первым ученым, употребившим собственно термин “геоэкология”, был немецкий географ К. Тролля, который понимал под ней одну из ветвей естествознания, объединяющую экологические и географические исследования в изучении экосистем*»⁶ или «*Наиболее подробно вклад К. Тролля в развитие геоэкологии подчеркнул К.К. Марков в своей статье “К. Тролля и современная география”*»⁷.

Что касается К. Тролля, то имя ему сделала в числе многих его фундаментальных работ основополагающая и обобщающая статья “Географическая наука в Германии в годы с 1933 по 1945 (Критика и оправдание)” (46 стр. и 310 источников), где термин “геоэкология” *не упоминается ни разу* [42]. В то время как в качестве базисного термина, отвечающего понятию геоэкология в географическом понимании, используется — **landschaftsökologie** (ландшафтная экология), который повторяется неоднократно.

Теперь несколько слов о часто упоминаемой статье К.К. Маркова “К. Тролля и современная география” [26]. Вот, что он писал: «*В 1972 году на русском языке была напечатана статья К. Тролля о ландшафтоведении....Тролля предпочитает говорить о “ландшафтной экологии”*». Во всей статье вообще нет ни одного упоминания слова “геоэкология”, т.е. использование этой статьи для подтверждения отнесения “геоэкологии” к географическим наукам, как и К. Тролля к ее основоположникам, также не обосновано.

Единственная статья К. Тролля, в которой упоминается термин “геоэкология” — это C. Troll: **Landschaftsökologie (Geoecology) und Biogeocoenologie. Eine terminologische Studie**⁸ [43]. К сожалению, ее не удалось найти на немецком языке. Слово, приведенное в скобках, к тому же на английском языке, заставляет нас думать, что данная вставка могла быть сделана редакцией румынского журнала “Revue Roumaine de Geologie, Geophysique et Geographie” при перепечатке статьи из немецкого издания.

Упоминание геоэкологии на английском языке, как и вообще обращение к иностранным исследованиям, весьма нехарактерно для немецко-

го ученого, каковым был К. Тролля. Заметим, кстати, что огромный объем источников, использованных автором в упомянутой выше статье, все были на немецком языке и немецких авторов.

Результаты нашего исследования подтверждают такие утверждения: «Термин “географическая экология” или “геоэкология” появился при переводе термина “ландшафтная экология” с немецкого на английский язык»⁹; или «Сам термин “геоэкология” появился в 1966 г. при переводе термина “ландшафтная экология” с немецкого языка на английский» [27].

Итак, все вышесказанное позволяет нам предположить, что сам К. Тролля термин “геоэкология” не употреблял. Но безусловно стал основоположником такого направления в географии как ландшафтная экология. Что дает географам-ландшафтоведам надежное основание для использования вместо термина “геоэкология” — “**ландшафтная экология**”, в отношении той области исследований, которая представляет собой изучение сложной структуры ландшафта и его экологической составляющей, т.е. является предметом такой науки, как ландшафтоведение.

В пользу использования термина “ландшафтная экология” вместо “геоэкология”, кроме обращения к трудам К. Тролля, говорят и другие исследования. В статье “Состояние ландшафтной экологии и перспективы ее развития” А. Рихлинг пишет: «*Определение термина “ландшафтная экология” формулировали разные авторы, однако приоритет принадлежит К. Троллю, который в конце 30-х годов XX века писал, что основная задача этой дисциплины — функциональный анализ*» [37].

Японский географ Т. Сигура пишет: «*Термин “ландшафтная экология”, введенный К. Троллям, развился как комплексная теория исследования природного пространства в Германии и других странах. Ландшафтно-экологические исследования стремятся, с одной стороны, к более строгой характеристике природных пространств и, с другой стороны, к картографическому представлению их структуры. Сегодня они являются одной из основных проблем физической географии. Ландшафтная экология — это новое направление в ландшафтных исследованиях, которое стремится к более точной характеристике и пониманию географического комплекса*» [41].

С того времени, когда К. Тролля предложил термин “ландшафтная экология”, до ее активного развития в 70-е гг. XX в. прошло около 40 лет. Отражением мирового интереса к ландшафтной экологии стало сначала основание в Нидерландах в 1972 г. Общества ландшафтной экологии, а затем в 1982 г. в г. Пьештяны (Словакия) уже опо-

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/Unknowable>

⁶ <https://ru-ecology.info/term/2788/>

⁷ <https://uchebnik-online.net/book/181-oxrana-okruzhayushhej-sredy-uchebnoe-posobie-maslyaev-vn/15-.html>

⁸ К. Тролля “Ландшафтная экология (геоэкология) и биогеоэкология. Терминологические исследования”.

⁹ История становления и развития геоэкологии как науки. <https://studwood.ru/>

минавшейся выше IALE – Международной ассоциации ландшафтной экологии.

ВЫВОДЫ

1. Современная наука эпистемология, предметом которой является философия познания, дает достаточно ясные критерии определения науки и логики ее развития. К логическим критериям научности относятся непротиворечивость, полнота, независимость, стройность, внутренняя организация и т.п. При этом исходным пунктом критерия научности выступает тезис неправомерности сведения одних наук к другим.

2. Согласно Аристотелю, существование предмета (объекта) предшествует появлению науки. Обоснование необходимости разделения употребляемого термина “геоэкология” на две отрасли наук основывается автором на обращении к исходным, прототипическим наукам, какими являются геология и география, имеющим различные объекты исследования. Если “геоэкология” географическая охватывает все сферы географической оболочки, то “геоэкология” в системе геологических наук имеет приуроченность к тем горизонтам литосферы и геологическим процессам, которые оказывают влияние на способы существования человека, осуществление и безопасность его хозяйственной деятельности, обеспечивая охрану геологической среды.

3. Объект научной деятельности становится таковым лишь вследствие активной материально-практической и теоретической деятельности исследователя – субъекта науки, в данном случае географа или геолога. Как те, так и другие проявляют себя в аттестуемой профессии, что создает коллективы специалистов, действующих в общем направлении своих объектов исследования. С этой точки зрения важно, что субъект познания реализует общественные цели и осуществляет познавательную деятельность каждый в своем специалитете – географическом или геологическом.

4. Исходной точкой науки является также комплекс проблем, которые она решает. Анализ проблем двух “геоэкологий” показывает, прежде всего, их существенное различие. Так, проблема геоэкологии, с точки зрения геологической науки, связана со строительством и промышленным освоением территорий и месторождений, для которых инженерно-геологические, гидрогеологические, геодинамические и геокриологические условия являлись со времени появления первых сооружений, дорог, мостов и т.д. главной исходной информацией. Проблемы геоэкологии в понимании географов – это состояние компонентов географической среды в связи с ее антропогенными изменениями, “призванные обеспечить выживание человечества” (С.П. Горшков). При-

чем речь не идет о технической стороне этой проблемы, а только об описательной и рекомендательной.

5. В настоящее время паритет фактически двух наук под одним названием признан как наименьшее зло, позволяющее относительно мирно сосуществовать профессиональным научным сообществам (кафедрам, институтам, журналам и т.д.).

6. Некритичность в отношении сложившегося принципа познания, когда разными специалистами рассматриваются разные объекты и решаются разные, не сводимые вместе задачи, под одним, общим названием, противоречит основам научной логики. Это позволяет говорить об обоснованности разделения существующей “геоэкологии” на две науки под разными названиями, что облегчило бы преподавательский процесс и освоение знаний, как в геологии, так и в географии.

7. Разделение существующего общего названия двух наук предполагается “пунктирным”, что обосновано практикой совместной работы географов и геологов для решения смежных проблем.

8. Засвидетельствованное выше необоснованное смешение под одним термином двух разных наук тормозит их развитие в теоретическом, практическом и образовательном аспектах.

9. Для замены термина “геоэкология” в работах ландшафтоведов, изучающих состояние ландшафта в различных экологических условиях, предлагается употреблять предложенный К. Троллем термин “ландшафтная экология”, широко используемый в работах российских и зарубежных географов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность участникам Научного теоретического семинара ИГЭ РАН за критические замечания и полезные предложения при обсуждении доклада на тему представленной статьи.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аристотель*. Метафизика [Пер. с древнегреч. А. Кубицкого]. М.: АСТ, 2019. 448 с.
2. *Аристотель*. Сочинения в четырех томах. / Ред. В.Ф. Асмус, 1976. М.: Мысль 1976. Т. 1. 125 с.
3. *Асланикашвили А.Ф.* Предмет познания географии // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1978. № 2. С. 150–157.
4. *Бачинский Г.А.* Геоэкология как область соприкосновения географии и социологии // Изв. ВГО. 1989. Вып. 1. С. 31–39.

5. *Богдарик Г.К.* Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
6. *Вартанян Г.С.* Современные проблемы экогеологии // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 1993. № 2. С. 33–36.
7. *Вернадский В.И.* Философские мысли натуралиста. М.: Академический проект, 2014. 412 с.
8. *Виноградов Б.В.* Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
9. Геоэкологические исследования в СССР: докл. сов. геол. / [Междунар. геол. конгр. XXVIII сес., Вашингтон, 1989]. М.: ВСЕГИНГЕО, 1989. 152 с.
10. Геоэкологический анализ холмисто-моренных территорий и рациональное использование земель. Минск: Изд-во Университетское, 1990. 88 с.
11. Геоэкология. Часть 2. Глобальная и ландшафтная геоэкология / Ю.Н. Гладкий, А.И. Жиров, И.В. Игнатенко и др. СПб.: Образование, 1997. С. 257–259.
12. *Голодковская Г.А., Куринов М.Б.* Экологическая геология – наука об оптимальной геологической среде? // Геоэкология. 1994. № 2. С. 29–36.
13. *Горшков С.П.* Концептуальные основы геоэкологии. Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 448 с.
14. *Гродзинский М.Д.* Основы ландшафтної екології. Київ: Віща школа, 1993. 222 с.
15. *Дедков А.П., Переведенцев Ю.И.* У истоков отечественной геоэкологии // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 1. С. 112–119.
16. *Жиров А.И., Гладкий И.Ю.* Современное состояние геоэкологии и геоэкологического образования // Сб. науч. тр. XI съезда РГО. Архангельск: Изд-во Русское географическое о-во, 2000.
17. *Жиров А.И.* Теоретические основы геоэкологии. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. 377 с.
18. *Заиканов В.Г. Минакова Т.Б., Булдакова Е.В.* Геоэкологическая безопасность урбанизированных территорий: подходы и пути реализации // Геоэкология. 2019. № 1. С. 17–24.
19. *Заиканова И.Н.* Палеогеоэкология восточной части верхнего течения р. Волги в эпоху палеолита // Геоэкология. 2017. № 5. С. 19–28.
20. *Ильин В.В.* Теория познания. Эвристика. Креатология. М.: Проспект, 2019. 174 с.
21. *Исаев Е.Н.* Геоэкология и оценка воздействия на окружающую среду при освоении минерально-сырьевых ресурсов // Разведка и охрана недр. 1992. № 6. С. 35–38.
22. *Исаченко А.Г.* Экологическая география Северо-запада России. Ч. 1. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1995. 206 с.
23. *Копнин П.В.* Диалектика, логика, наука М.: Наука, 1973. 464 с.
24. *Кочуров Б.И.* География экологических ситуаций (экодиагностика территорий). Смоленск: Изд-во СГУ, 1999. 154 с.
25. *Ласточкин А.Н.* Геоэкология ландшафта (экологические исследования на геотопологической основе). СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1995. 280 с.
26. *Марков К.К.* Тролль и современная география // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1976. № 3. С. 145–154.
27. *Масляев В.Н.* Геоэкология: современные методы исследований. Уч. пос. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. с. 149. [Электр. ресурс]. http://orpen-do.mrsu.ru/pluginfile.php/116590/mod_resource/content/1/Геоэкология_современные%20методы%20исследований.pdf
28. *Милль Дж.Ст.* Система логики силлогической и индуктивной. М.: ЛЕНАНД, 2011. 832 с.
29. *Мильков Ф.Н.* Экография как новый раздел современного ландшафтоведения // Теоретические и практические вопросы ландшафтной экологии и заповедного дела. Екатеринбург, 1993. С. 3–7.
30. *Морачевский В.Г.* Геоэкологические проблемы атмосферы // Основы геоэкологии. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1994. С. 159–170.
31. *Осипов В.И.* Геоэкология – междисциплинарная наука о экологических проблемах геосфер // Геоэкология. 1993. № 1. С. 4–18.
32. *Островский В.Н., Островский Л.А.* Концептуальные вопросы геоэкологии // Отечественная геология. 1993. № 7. С. 97–102.
33. *Поппер К.* Вся жизнь – решение проблем. Ч. 1. Вопросы познания. М.: Едиториал УРСС, 2019. 190 с.
34. *Платон.* Теэтет. [Пер. с греческого Сережникова В.]. М.–Л.: СОЦЭКГИЗ. 1936. 192 с.
35. *Поздеев В.Б.* Введение в геоэкологию: Предпосылки географической экологии. Смоленск: Изд-во СГУ, 1999. 120 с.
36. *Пузаченко Ю.Г.* Направления географической экологии // Современные проблемы географии экосистем. М.: ИГ АН СССР, 1984. С. 38–42.
37. *Рихлинг А.* Состояние ландшафтной экологии и перспективы ее развития // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5: география. 2009. № 6. С. 26–29.
38. *Сычев К.И.* Научное содержание и основные направления геоэкологии // Разведка и охрана недр. 1991. № 11. С. 2–6.
39. *Трофимов В.Т.* Парадоксы современной геоэкологии. // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4: геология. 2009. № 4. С. 3–13.
40. *Чибилев А.А.* Введение в геоэкологию (Эколого-географические аспекты природопользования). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1998. 122 с.
41. *Sugiura T.* Die Theorie und Methode der Landschafts-ökologie unter besonderer Berücksichtigung der in DDR. Philosophy // Annals of The Tohoku Geographical Association, 1974. V. 27. Is. 3. P. 137–148. <https://doi.org/10.5190/TGA1948.26.137>
42. *Troll C.* Die geographische Wissenschaft in Deutschland in den Jahren 1933 bis 1945 (Eine Kritik und Rechtfertigung) // Erdkunde. 1947. Bd. 1. H. 1/3. P. 3–48. <https://www.jstor.org/stable/25635385>
43. *Troll C.* Landscape ecology (geoecology) and biogeocenology – A terminological study // Geoforum. 1971. V. 2. Is. 4. P. 43–46. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(71\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0016-7185(71)90029-7)

GEOECOLOGY SCIENCE AS IMITATION OF EPISTEMOLOGICAL UNITY IN DIVERSION: SUBJECTS, OBJECTS, AND PROBLEMS

I. N. Zaikanova^{a, #}

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

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

In the scientific publications, there are simultaneously two areas of knowledge, i.e., two sciences, bearing one and the same name “geoecology”. The thesis of the illegality of reducing some sciences to others or their opposition is the starting point of scientific criterion. The simultaneous existence of two sciences with the same name contradicts logic, in particular, the Law of Identity by Aristotle. Geographers attribute the appearance of the term “geoecology” to Karl Troll, a geographer whose main scientific works are devoted to the study of relief, aerial geographic exploration and landscape-ecological decoding of aerial photographs. The name “geoecology” in the geological sense is contained in the name of Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, several geological departments at higher school in the Russian Federation, as well as the journal “Geoecology”. Non critical attitude towards the adopted principle of cognition, when different experts examine different objects and solve different problems that cannot be brought together, under one, common name, contradicts the foundations of scientific logic. The unsolved problem of two “geoecologies” caused the appearance of numerous articles and books that exclude the unity of opinion and internal logic. The author of this article, using the methods of epistemology, shows that all the criteria of the logic of science, i.e., the object, the subject and the problem, are different in these two geoecologies. The names for these sciences are offered that do not contradict the essence of both geology and geography.

Keywords: *geoecology, epistemology, logic of science, object, subject, problems*

REFERENCES

1. Aristotle *Metafizika* [Metaphysics]. Moscow, AST Publ., 2019, 448 pp. (in Russian)
2. Aristotle Op., vol. 1. Moscow, Mysl' Publ., 1976, pp. 125. (in Russian)
3. Aslanikashvili, A.F. *Predmet poznaniya geografii* [The subject of cognition in geography]. *Izv. AN SSSR, Ser. geogr.*, 1978, no. 2, pp. 150–157. (in Russian)
4. Bachinskii, G.A. *Geoekologiya kak oblast' soprikosnoveniya geografii i sotsiologii* [Geoecology as an area of contact between geography and sociology]. Moscow, *Izvestia VGO*, 1989, no. 1, pp. 31–39. (in Russian)
5. Bondarik, G.K. *Obshchaya teoriya inzhenernoi (fizicheskoi) geologii* [General theory of engineering (physical) geology]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 256 p. (in Russian)
6. Vartanyan, G.S. *Sovremennye problemy ekogeologii* [Modern problems in ecogeology]. *Mineral'nye resursy Rossii*, 1993, no. 2, pp. 33–36. (in Russian)
7. Vernadskii, V.I. *Filosofskie mysli naturalista* [Philosophical thoughts of a naturalist]. Moscow, Akademicheskii proekt Publ., 2014, 412 pp. (in Russian)
8. Vinogradov, B.V. *Osnovy landshaftnoi ekologii* [Fundamentals of landscape ecology]. Moscow, GEOS Publ., 1998, 418 pp. (in Russian)
9. *Geoekologicheskie issledovaniya v SSSR: dokl. sov. geol. na 28 sessii Mezhdunar. geol.kongr* [Geoecological research in the USSR. Report at the 28th IGC]. Moscow VSEGINGEO Publ., 1989, 152 pp. (in Russian)
10. *Geoekologicheskii analiz kholmisto-morenykh territorii i ratsional'noe ispol'zovanie zemel'* [Geoecological analysis of hilly moraine territories and rational land use]. Minsk, Universitetskoe Publ., 1990, 88 pp. (in Russian)
11. Gladkii, Yu.N. et al. *Geoekologiya. Chast' 2. Global'naya i landshaftnaya geoekologiya* [Geoecology. Part 2. Global and landscape geoecology]. St. Petersburg, Obrazovanie Publ., 1997, 264 pp. (in Russian)
12. Golodkovskaya, G.A., Kurinov, M.B. *Ecologicheskaya geologiya – nauka ob optimalnoi geologicheskoi srede? [Ecological geology as the science of an optimal geological environment?].* *Geoekologiya*, 1994, no. 2, p. 29–36. (in Russian)
13. Gorshkov, S.P. *Kontseptual'nye osnovy geoekologii* [Conceptual foundations of geoecology]. Smolensk, SGU Publ., 1998, 448 pp. (in Russian)
14. Grodzinskii, M.D. *Osnovy landshaftnoi ekologii* [Basics of landscape ecology]. Kyiv, Vishcha shkola Publ., 1993, 222 p. (in Ukrainian)
15. Dedkov, A.P., Perevedentsev, Yu.I. *U istokov otechestvennoi geoekologii* [At the origins of domestic geoecology]. *Izvestiya RAN, ser. Geogr.*, 1995, no. 1, pp. 112–119. (in Russian)
16. Zhirov, A.I., Gladkii, I.Yu. *Sovremennoe sostoyanie geoekologii i geoekologicheskogo obrazovaniya* [The current state of geoecology and geoecological education]. Proc. XI Congress of the Russian Geographical Society, Arkhangelsk, RGO Publ., 2000, pp. 15–27. (in Russian)
17. Zhirov, A.I. *Teoreticheskie osnovy geoekologii* [The theoretical foundations of geoecology]. St. Petersburg, SPbU Publ., 2001, pp. 376 (in Russian)
18. Zaikanov, V.G. et al. *Geoekologicheskaya bezopasnost' urbanizirovannykh territorii: podkhody i puti realizatsii* [Geoecological safety of urban areas: approaches and ways of implementation]. *Geoekologiya*, 2019, no 1, pp. 17–24. (in Russian)
19. Zaikanova, I.N. *Paleo-geoekologiya vostochnoi chasti verkhnego techeniya r. Volgi v epokhu paleolita* [Paleo-

- geocology of the eastern part of the upper course of the river Volga in the Paleolithic era]. *Geoekologiya*, 2017, no. 5, pp. 19–28. (in Russian)
20. Il'in, V.V. *Teoriya poznaniya. Evristika. Kreatologiya* [Theory of knowledge. Heuristic. Creatology]. Moscow, Prospect Publ., 2019, 174 p. (in Russian)
 21. Isaev, E.N., et al. *Geoekologiya i otsenka vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu pri osvoenii mineral'no-syr'evykh resursov* [Geoecology and environmental impact assessment upon the development of mineral resources]. *Razvedka i okhrana nedr*, 1992, no. 6, p. 35–38. (in Russian)
 22. Isachenko, A.G. *Ekologicheskaya geografiya Severo-zapada Rossii* [Ecological geography of the Northwest of Russia]. Part 1. St. Petersburg, SPbU Publ., 1995, 206 p. (in Russian)
 23. Kopnin, P.V. *Dialektika, logika, nauka* [Dialectics, logic, science]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 464 p. (in Russian)
 24. Kochurov, B.I. *Geografiya ekologicheskikh situatsii (ekodiagnostika territorii)* [Geography of environmental situations (ecological diagnostics of territories)]. Smolensk, Izd-vo SGU, 1999, 154 p. (in Russian)
 25. Lastochkin, A.N. *Geoekologiya landshafta (ekologicheskie issledovaniya na geotopologicheskoi osnove)* [Geoecology of the landscape (environmental studies on a geotopological basis)]. St. Petersburg, SPbU Publ., 1995, 280 p. (in Russian)
 26. Markov, K.K. *Troll' i sovremennaya geografiya* [Troll and modern geography]. *Izv. AN SSSR, Ser. geogr.*, 1976, no. 3, pp. 78–87. (in Russian)
 27. Maslyayev, V.N. *Geoekologiya: sovremennye metody issledovaniya* [Geoecology: modern research methods]. Saransk, Izd-vo Mordov. un-ta, 2020, 149 pp. (in Russian)
 28. Mill, J.St. *Sistema logiki sillogicheskoi i induktivnoi* [The syllogic and inductive logic system]. Moscow, LENAND Publ., 2011, 832 p. (in Russian)
 29. Mil'kov, F.N. *Ekografiya kak novyi razdel sovremennogo landshaftovedeniya* [Ecography as a new section of modern landscape science]. *Teoreticheskie i prakticheskie voprosy landshaftnoi ekologii i zapovednogo dela* [Theoretical and practical issues of landscape ecology and conservation]. Yekaterinburg, 1993, pp. 3–7. (in Russian)
 30. Morachevskii, V.G. *Geoecologicheskije problemy atmosfery* [Geoecological problems in the atmosphere], *Osnovy geoekologii* [Fundamentals of geoecology]. St. Petersburg, SPbU Publ., 1994, pp. 159–170. (in Russian)
 31. Osipov, V.I. *Geoekologiya – mezhdisciplinarnaya nauka o ekologicheskikh problemakh geosfer* [Geoecology as an interdisciplinary science about the environmental problems of geospheres]. *Geoekologiya*, 1993, no. 1, pp. 4–18. (in Russian)
 32. Ostrovskii, V.N., Ostrovskii, L.A. *Kontseptual'nye voprosy geoekologii* [Conceptual issues of geoecology]. *Otechestvennaya geologiya*, 1993, no. 7, pp. 97–102. (in Russian)
 33. Popper, K. *Vsya zhizn' – reshenie problem. Chast' 1. Voprosy poznaniya*. [Whole life is a solution to problems. Part 1. Questions of knowledge]. Moscow, URSS Editorial Publ., 2019, 190 p. (in Russian)
 34. Platon. *Teetet*. Translated from Greek by Serezhnikov V. Moscow, Leningrad, SOTSEGGIZ Publ., 1936, 192 p. (in Russian)
 35. Pozdeev, V.B. *Vvedenie v geoekologiyu: Predposylki geograficheskoi ekologii* [Introduction to geoecology: Background of geographic ecology]. Smolensk, SGU Publ., 1999, 120 p. (in Russian)
 36. Puzachenko Yu.G. *Napravleniya geograficheskoi ekologii*. [Directions of geographical ecology]. *Sovremennye problemy geografii ekosistem* [Modern problems of the geography of ecosystems]. Moscow, IG AN SSSR Publ., 1984, pp. 38–42. (in Russian)
 37. Richling, A. *Sostoyanie landshaftnoi ekologii i perspektivy ee razvitiya* [State of landscape ecology and prospects for its development]. *Vest. Mosk. un-ta, ser. 5 Geografiya*, 2009, no. 6, pp. 26–29. (in Russian)
 38. Sychev, K.I. *Nauchnoe sodержanie i osnovnye napravleniya geoekologii* [The scientific content and the main directions of geoecology]. *Razvedka i okhrana nedr*, 1991, no. 11, pp. 2–6. (in Russian)
 39. Trofimov, V.T. *Paradoksy sovremennoi geoekologii* [Paradoxes of modern geoecology]. *Vestnik. MGU, seriya 4. Geologiya*, 2009, no. 4, pp. 3–13. (in Russian)
 40. Chibilev, A.A. *Vvedenie v geoekologiyu (Ekologo-geograficheskie aspekty prirodopol'zovaniya)* [Introduction to geoecology (Ecological and geographical aspects of environmental management)]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 1998, 122 p. (in Russian)
 41. Sugiura, T. Die Theorie und Methode der Landschaftsökologie unter besonderer Berücksichtigung der in DDR. Philosophy. *Philosophy Annals of The Tohoku Geographical Association*, 1974, vol. 26, 137–148 pp. (in German)
 42. Troll, C. Die geographische Wissenschaft in Deutschland in den Jahren 1933 bis 1945 (Eine Kritik und Rechtfertigung), *Erdkunde* Bd. 1, H. 1/3, 1947, pp. 3–48. (in German)
 43. Troll, C. Landscape ecology (geoecology) and biogeocenology – A terminological study. *Geoforum*. 1971. V. 2. Is. 4. P. 43–46.
[https://doi.org/10.1016/0016-7185\(71\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0016-7185(71)90029-7).

XXIII СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ “ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ГРУНТОВЕДЕНИЯ”

DOI: 10.31857/S0869780922040038

После двухлетнего перерыва, связанного с эпидемиологическими ограничениями, в 2022 г. возобновилось проведение ежегодной научной конференции “Сергеевские чтения” в память о выдающемся советском и российском ученом, инженер-геологе и грунтоведе, педагоге и организаторе науки, академике Евгении Михайловиче Сергееве (1914–1997). Согласно Постановлению бюро ОГГГН РАН №13100/5-49 от 18 марта 1998 г. “Об увековечении памяти академика Е.М. Сергеева”, эта конференция организуется как расширенная годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Дата проведения чтений, приуроченная ко дню рождения Е.М. Сергеева – 23 марта, совпавшим с днем его кончины, традиционно приходится на третью декаду марта.

Научная тематика Сергеевских чтений отличается от года к году. Сообразуясь с потребностями и вызовами времени, она затрагивает различные актуальные вопросы современной геоэкологии и инженерной геологии. Одним из фундаментальных разделов инженерной геологии как науки является грунтоведение, развитию которого академик Е.М. Сергеев уделял особое внимание, и именно вопросам грунтоведения посвящена значительная часть научного наследия этого ученого. Следует отметить, что после проведения почти 20 лет назад конференции “Многообразие грунтов: морфология, причины, следствия” (2003 г.) на геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова научных мероприятий, полностью посвященных проблемам грунтоведения, в стране не проводилось, несмотря на то, что теоретические положения этой науки составляют ядро методического подхода при изучении грунтов и их массивов в связи с решением любых инженерных задач.

Вопросы грунтоведения, механики и технической мелиорации грунтов частично затрагивались в рамках Сергеевских чтений в разные годы. В 2022 г. впервые конференцией было решено целиком посвятить этому важнейшему научному направлению. Как отметил проф. Е.А. Вознесенский, необходимость обращения к вопросам грунтоведения в рамках этой конференции была

продиктована новыми тенденциями, возникшими за последние десятилетия в современной инженерно-строительной практике, и развитием новых методов исследования грунтов.

XXIII Сергеевские чтения на тему “Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения” состоялись 31 марта–1 апреля в г. Санкт-Петербург. Организаторами конференции традиционно выступили Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН и Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, а принимающей стороной в этом году стало Охотинское общество грунтоведов (г. Санкт-Петербург). Чтения состоялись при финансовой поддержке ООО ИСП “Геореконструкция” и ООО “Геоинжсервис” (группа компаний FUGRO). Оргкомитет конференции возглавили академик В.И. Осипов, член-корр. В.Г. Румынин, проф. Е.А. Вознесенский. Площадкой проведения мероприятия стал конференц-зал отеля “Азимут – Санкт-Петербург”. За всю историю Сергеевских чтений это второй случай проведения выездной конференции вне столицы. Первый такой опыт состоялся в 2019 г., когда XXI Сергеевские чтения были организованы в г. Пермь на базе Пермского государственного научно-исследовательского университета (ПГНИУ). Опыт оказался удачным, поскольку смена региона позволила значительно расширить географический состав участников конференции и круг рассматриваемых научных проблем, а интересная и познавательная полевая экскурсия стала приятным дополнением к научным заседаниям. Возобновленные после пандемии чтения, посвященные вопросам грунтоведения, тоже было решено провести в формате выездной сессии. Город Санкт-Петербург, известный своей мощной научной грунтоведческой школой, успешно развивающейся как в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ), так и в Санкт-Петербургском горном университете (Горный университет), стал наилучшим выбором для места проведения чтений.

Большую помощь в проведении мероприятия оказали наши коллеги из Санкт-Петербурга – члены Охотинского общества грунтоведов:

Ю.Ю. Соколова и вице-президент Общества В.А. Юлин; а также генеральный директор ООО ИСП “Геореконструкция” А.Г. Шашкин, которым Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии приносит искреннюю благодарность.

Устная программа конференции включала 1 пленарное и 4 секционных заседаний. Пленарное заседание чтений открылось музыкальным выступлением, исполненным квартетом им. Н.А. Римского-Корсакова с участием солиста Т. Яхнова — лауреата Международного телевизионного конкурса “Щелкунчик” 2015 г. Такое приятное дополнение к традиционной программе научной сессии создало в зале приподнятую творческую атмосферу, вдохновило участников на плодотворное обсуждение назревших проблем.

Открывая научную часть конференции, с приветственным словом к собравшимся обратились председатель Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, научный руководитель ИГЭ РАН академик В.И. Осипов и директор ИГЭ РАН, президент Охотинского общества грунтоведов, профессор Е.А. Вознесенский.

Пленарное заседание чтений было посвящено развитию теории современного грунтоведения. Некоторые достижения в области исследования дисперсных грунтов были оглашены в докладах Е.А. Вознесенского и Ф.С. Карпенко (ИГЭ РАН, г. Москва). Проф. Е.А. Вознесенский, освещая новые методические задачи и подходы к изучению грунтов, показал, что “передний край” современных исследований поведения грунтов по-прежнему проходит в области нелинейной механики, хотя некоторые из ее базовых принципов известны с конца XIX века. По его мнению, наиболее важные и интересные задачи связаны не столько с разработкой новых моделей и выводом более универсальных уравнений состояния грунтов, сколько с пониманием природы обуславливающих их процессов. Зав. лабораторией ИГЭ РАН к.г.-м.н. Ф.С. Карпенко рассказал о новых взглядах на свойства глинистых грунтов с позиций физико-химической теории прочности. Рассматривая глинистые грунты как “чувствительные” дисперсные системы, в которых внешнее воздействие вызывает закономерную ответную реакцию, выражающуюся в изменении строения и свойств из-за нарушения баланса энергии взаимодействия частиц, автор предлагает в прогнозных расчетах устойчивости в реальных условиях нагружения использовать показатели общей и реальной эффективной прочности и деформируемости глинистых грунтов.

Вторая часть пленарного заседания была мемориальной, посвященной выдающимся ученым нашего времени, внесшим значительный вклад в

исследование грунтов. Заведующий кафедрой почвоведения и экологии почв СПбГУ А.В. Русаков выступил с воспоминаниями о ярком представителе современной школы грунтоведения в Санкт-Петербурге, организаторе Охотинского общества грунтоведов и журнала “Грунтоведение”, безвременно ушедшем из жизни, д.г.-м.н. Д.Ю. Здобине. Страстно преданный науке, Д.Ю. Здобин внес большой вклад в сохранение и дальнейшее развитие научной школы генетического грунтоведения, созданной выдающимися учеными в советский период. С первых лет проведения нашей конференции Дмитрий Юрьевич был неизменным ее участником; он регулярно выступал с трибуны Сергеевских чтений, делился с коллегами своими новыми достижениями и теоретическими обобщениями в области изучения глин и илов, а также неоднократно оказывал неоценимую практическую помощь в подготовке конференции. Память об этом талантливом и неравнодушном человеке останется в сердцах его благодарных коллег.

В завершении пленарного заседания Сергеевских чтений состоялось традиционное объявление лауреатов и торжественное вручение медали Е.М. Сергеева “За вклад в развитие инженерной геологии”. Решением жюри лауреатами медали в 2022 г. стали: д.г.-м.н. Д.Ю. Здобин (посмертно), д.т.н. Г.Г. Болдырев, к.г.-м.н. Н.А. Ларионова, д.г.-м.н. Ю.Б. Осипов и д.г.-м.н. Л.В. Шаумян.

Секционные заседания были посвящены рассмотрению различных аспектов практического приложения научных достижений грунтоведения:

- изучение состава и свойств грунтов в практике инженерных изысканий,
- изучение массивов грунтов в целях прогнозирования и оценки опасных природных процессов,
- методические вопросы изучения грунтов и моделирование,
- геоэкологические аспекты изучения массивов природных и техногенных грунтов.

Заседание первой секции “Изучение состава и свойств грунтов в практике инженерных изысканий” открылось докладом коллектива авторов Санкт-Петербургского отделения ИГЭ РАН (СПБО ИГЭ РАН), представленным М.В. Вилькиной, на тему “Изучение фильтрационной неоднородности кембрийских глин при обосновании окончательной изоляции отходов”. Эти исследования, проведенные в районе полигона токсичных отходов Красный Бор, на конкретном примере показывают исключительную важность изучения состава и свойств грунтов для обеспечения экологической безопасности территорий. Большой интерес вызвал также другой доклад коллектива авторов СПБО ИГЭ РАН, под руководством член-корр. РАН В.Г. Румынина, в кото-

ром было продемонстрировано успешное применение современных программных комплексов геологического моделирования для оценки инженерно-геологических условий площадки строительства инженерного сооружения повышенной опасности и ответственности – ЛАЭС-2. В.А. Ерзова с соавторами провели геометризацию и детализацию внутреннего строения палеодолины как инженерно-геологического фактора, осложняющего строительство. Ряд докладов, в том числе коллективов авторов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ (Е.Н. Самарин и др., Н.В. Абакумова и др.), а также ООО НИЦ “Строй ГеоСреда” из Екатеринбурга (О.Н. Овечкина), был посвящен вопросам изучения состава, строения и свойств грунтов в целях сохранения объектов культурно-исторического наследия или возведения новых храмовых комплексов.

Интересным объектом исследований Е.Н. Самарина, И.В. Аверина, С.К. Николаевой, Н.В. Абакумовой и других специалистов геологического факультета МГУ стал Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь. Развитие природных экзогенных процессов, угрожающих этому уникальному объекту, ставят на повестку дня вопросы бережной рациональной эксплуатации монастырского комплекса на основе грамотного анализа геологических и геоморфологических условий территории. Всестороннее исследование различных горизонтов грунтового массива, слагающих основание древнего исторического сооружения, мониторинг его состояния и, возможно, разработка и применение мер по укреплению позволят сохранить этот уникальный памятник отечественной истории. Исследованию слабых нарушенных карбонатных грунтов в зоне выветривания посвящено исследование коллектива авторов Казанского государственного университета (А.И. Латыпов и др.). Им удалось установить закономерности преобразования пород под влиянием процессов гипергенеза и охарактеризовать неоднородный по строению и свойствам вертикальный профиль элювиальной толщи Бугульминско-Белебеевской возвышенности, служащий основанием многих промышленных и гражданских объектов, и на основании этого дать оценку карстово-суффозионной опасности в данном индустриальном регионе.

Работа секции, посвященной изучению массивов грунтов в целях оценки и прогнозирования опасных природных процессов, открылась приглашенным докладом специалиста с мировым именем в области изучения гравитационных процессов к.г.-м.н. А.Л. Строма (ООО “Центр геодинамических исследований”, г. Москва). Каменные лавины, образующиеся при обрушении высокогорных склонов, сложенных скальными грунтами, отличаются исключительно высокой

подвижностью, что, с учетом большого объема смещающихся грунтов, представляет большую опасность для населения и инженерных объектов. На примере высокогорных каменных лавин Тянь-Шаня и Памира А.Л. Стром убедительно показал, что гранулометрический состав и строение этих отложений дают ключ к пониманию механизма их перемещения. Эта информация важна и для понимания высокой подвижности каменных лавин, и для оценки устойчивости и вероятности прорыва завальных плотин.

Гравитационным процессам в высокогорных районах был также посвящен доклад другого исследователя – И.А. Торгоева (Институт механики и освоения недр НАН Кыргызстана, г. Бишкек). Им исследованы состав и свойства техногенных грунтов в целях оценки их ползучести на высокогорном золотом руднике Кумтор. Несколько докладов касались изучения грунтовых массивов, находящихся под воздействием гравитационных процессов в платформенных условиях. Так, О.В. Зеркаль (МГУ, Москва) от имени коллектива авторов доложил об исследовании изменения состава и строения юрских глин в зоне оползневых смещений на участке “Воробьевы горы”, а М.М. Кучуков (ИГЭ РАН) рассказал о поведении грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока. Результаты изучения грунтов, представленные на конференции сотрудниками ПГНИУ (г. Пермь), касались оценки активности карстовых процессов. Исходя из сравнительного анализа условий развития карста в пределах опорных участков Москвы, Нижегородской и Владимирской областей, Т.Г. Ковалева, З.В. Селина и др. в своем докладе показали, что наличие мощной перекрывающей глинистой толщи не исключает процесс првалобразовании. Авторами указано, что при анализе условий и факторов развития карста важно обращать внимание на генезис, возраст, сложение перекрывающих отложений. Исследование Е.В. Дробининой было направлено на поиск закономерностей в изменении свойств растворимых грунтов карстующегося массива. Грунтовые массивы в области криолитозоны, затронутые такими процессами, как овражная термоэрозия и пучение, были предметом изучения молодых исследователей, представлявших Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург), – А.В. Быковой, Е.С. Зыряновой, А.А. Худякова.

Большой интерес и последующую оживленную дискуссию вызвали доклады, оглашенные на секции “Методические вопросы изучения грунтов и моделирование”. Новые методы и методики исследований всегда представляют собой передовой край научного познания. Доклады участников Сергеевских чтений были посвящены развитию лабораторных, полевых и дистанционных

методов изучения разнообразных грунтов, залегающих в различных природных обстановках (скальные, дисперсные, многолетнемерзлые грунты, торфяные отложения осушенных болот, грунты шельфа, склоновые отложения и др.). При этом для решения методических вопросов особенно важно взаимодействие представителей разных направлений науки. Инженерно-геологические проблемы изучения грунтовых массивов часто могут быть решены только в сотрудничестве грунтоведов с инженерами-геотехниками.

Поэтому неудивительно, что заседание этой секции открылось приглашенным докладом генерального директора ООО ИСП “Геореконструкция”, д.г.-м.н. А.Г. Шашкина, рассказавшем о предсказательном назначении моделей механики грунтов. Рассматривая важный вопрос о конечной осадке грунтовых оснований сооружений, докладчик на конкретных примерах исторических зданий в Санкт-Петербурге и Москве показал, что для развития моделей необходимо создание базы данных наблюдений за длительными деформациями для проверки качества прогнозов, генерируемых различными моделями. Горячее обсуждение вызвал доклад доцента кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ к.т.н. А.Ю. Мирного, который предложил использовать энергетический подход к интерпретации результатов испытаний трехосного сжатия грунтов. Отмечая, что большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер и не объясняет физической природы протекающих процессов, автор обосновывает возможность использования энергетического подхода, который успешно применяется в разных областях механики. Интерпретации результатов испытаний прочностных характеристик грунтов также был посвящен доклад к.г.-м.н. Е.В. Федоренко (НИП-Информатика, г. Санкт-Петербург). Особо следует отметить интересный доклад коллектива авторов из ИГЭ РАН, представленный аспиранткой Е.О. Дерновой, о методах исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения; а также доклад аспиранта кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ И.Е. Большакова, сообщение которого было посвящено оригинальной методике определения свойств гидротермально измененных вулканических пород Камчатки с помощью молотка Шмидта.

Заключительная секция конференции была посвящена геоэкологическим аспектам изучения массивов природных и техногенных грунтов. Большая часть представленных докладов касалась вопросов загрязнения грунтов, почв и подземных вод в районах интенсивного техногенного воздействия: в промышленных зонах, в местах добычи полезных ископаемых, на территориях размещения полигонов ТКО. Так, д.г.-м.н. И.В. Галиц-

кая (ИГЭ РАН, г. Москва) рассказала о результатах изучения загрязненных грунтов, как вторичного источника загрязнения на территориях размещения полигонов ТКО, об оценке опасности загрязнения отложений зоны аэрации в районах размещения свалок ТКО с помощью различных методов и критически проанализировала преимущества и недостатки используемых подходов. По мнению авторов доклада, наиболее перспективным в этих целях является подход, заключающийся в моделировании влаго- и массопереноса как на уровне грунтовых вод в заданные периоды времени, так и в разрезе зоны аэрации.

Решению актуальной задачи, имеющей важное экологическое значение для Пермского региона, был посвящен доклад коллектива авторов из ПГНИУ, представленный Заслуженным экологом РФ, к.г.-м.н. Н.Г. Максимовичем. Он рассказал собравшимся о формировании техногенных донных отложений под влиянием изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна. Несмотря на то что промышленное функционирование этого объекта давно прекращено, последствия разлива шахтных вод до сих пор оказывают негативное влияние на состояние речных систем региона. Вниманию к эколого-геохимическому состоянию речных донных отложений неблагоприятного в геоэкологическом отношении Пермского края было привлечено также в докладе А.Д. Перевошиковой (ПГНИУ).

Особое направление исследований представляет собой изучение грунтов как объектов технической мелиорации в целях искусственного улучшения их свойств. Емкий содержательный доклад об особенностях твердения гидратированных зол и зологрунтовых систем представила на конференции известный специалист в области технической мелиорации грунтов, лауреат медали Е.М. Сергеева к.г.-м.н. Н.А. Ларионова (МГУ). В докладе убедительно показано, что активное использование зол для укрепления грунтов в дорожном строительстве позволяет решать важные экономические и экологические задачи — сокращать расход вяжущих веществ и объемы накапливаемых промышленных отходов. Исследования, направленные на физико-химическое преобразование грунтов в строительных целях, продолжают традиционно успешно развиваться на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ. Интересные результаты представила сотрудник этой кафедры И.А. Родькина о влиянии аутигенных пленок на поглощающую способность песчаных грунтов по отношению к свинцу.

Всего за два дня работы конференции были заслушаны 33 устных доклада, т.е. все, запланированные программой, что нечасто случается на конференциях. Можно предположить, что этому

поспособствовал дефицит персонального научного общения в предыдущие два года. К сожалению, ограниченное время устной сессии не позволило огласить все поступившие в адрес конференции доклады. Однако материалы, принятые оргкомитетом к публикации, размещены в электронном сборнике трудов XXIII Сергеевских чтений, который был выпущен издательством “Геоинфо” к началу работы конференции. Сборник трудов чтений, включающий 78 докладов, включен в базу данных научного цитирования РИНЦ и доступен для скачивания на сайте www.sergeev2022conf.ru. Лучшие доклады в расширенном виде также будут опубликованы в журналах “Геоэкология” и “Грунтоведение”.

В работе конференции очное участие приняли 132 специалиста из 12 городов России, Азербайджана и Киргизии: Москвы, Санкт-Петербурга, Пензы, Екатеринбург, Тюмени, Уфы, Якутска, Перми, Казани, Архангельска, Баку и Бишкека. Участники конференции представляли 33 учебных, научных и производственных организаций. Еще 20 слушателей участвовали дистанционно, через онлайн подключение на сайте конференции. Приятно, что конференцию не обошли вниманием студенты и аспиранты профильных вузов Санкт-Петербурга, для которых эта встреча дала уникальную возможность общения с известными учеными-грунтоведами, инженерами-геологами и геотехниками.

Научная программа конференции сопровождалась работой технической выставки, на которой свое оборудование представила компания “Геотек” (г. Пенза). По окончании научной программы слушателям было предложено несколько интереснейших экскурсий. Доктор технических наук А.Г. Шашкин провел в зале виртуальную техническую экскурсию “Развитие неравномерных осадок Исаакиевского собора”; а затем он же пригласил участников чтений на пешеходную геотехническую экскурсию “Ансамбль “Новая Голландия”: приспособление памятника промышленной архитектуры XVIII в. для современного использования”. Доцент кафедры минералогии Института наук о Земле СПбГУ, к.г.-м.н. А.А. Золотарев провел увлекательную и очень познавательную геолого-минералогическую экскурсию на тему “Каменное убранство Санкт-Петербурга”. Приятным дополнением к научной программе стал товарищеский ужин для участников конференции, представивший возможность коллегам из разных городов продолжить общение и завершить неоконченные научные дискуссии.

Оргкомитет с удовлетворением отмечает, что научная конференция XXIII Сергеевские чтения прошла успешно, ее обновленный формат получил одобрение и поддержку участников. Мы благодарим всех докладчиков и слушателей за активное участие в конференции и надеемся на новые регулярные встречи в будущем.

О.Н. Еремина, Е.А. Вознесенский