

АКТУАЛЬНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ: ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ РИСКОВ И СИСТЕМНОЕ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

© 2022 г. С. В. Шварев^{a,b,*}, В. Н. Голосов^{a,c,**}, Е. В. Лебедева^{a,***},
Э. А. Лихачёва^{a,****}, С. В. Харченко^{a,c,*****}

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

^cМГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

*E-mail: shvarev@igras.ru

**E-mail: golosov@igras.ru

***E-mail: e.lebedeva@igras.ru

****E-mail: lihacheva@igras.ru

*****E-mail: harchenko@igras.ru

Поступила в редакцию 07.02.2022 г.

После доработки 20.02.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

В статье рассматриваются основные направления исследований лаборатории геоморфологии Института географии РАН в условиях глобальных природных и антропогенных вызовов последних десятилетий, в числе которых, с одной стороны, естественные климатические, вулканические, тектонические изменения, а с другой — тотальная трансформация человеком поверхности Земли. Влияние человека на геологическую среду за последние 100 лет достигло уровня, когда следы его деятельности стали геологическим фактором, что дало основание для выделения нового геологического этапа — антропоцена. В геоморфологии меняется парадигма рельефообразования как контрапункта эндогенных и экзогенных процессов: в неё начинает включаться третья составляющая — антропогенная. Сочетание природных и антропогенных причин способствует изменению режима рельефообразующих процессов, которые всё чаще приобретают катастрофический характер. Вместе с тем благодаря новым методам и данным повышается уровень понимания факторов и механизмов развития этих процессов, расширяются технологические возможности предотвращения или минимизации негативных последствий их проявления. Это определяет актуальные задачи современной геоморфологии, в том числе направлений деятельности лаборатории геоморфологии: разработка и применение новых методов исследования рельефа и рельефообразующих процессов, анализ данных, моделирование и картографирование; изучение глобальных, региональных и локальных тенденций рельефообразования; исследование принципов функционирования и проектирования антропогенно-геоморфологических систем; синтез данных — оценка геоморфологических опасностей и рисков и геоморфологический прогноз.

Ключевые слова: методы геоморфологических исследований, геоморфологическое моделирование, геоморфологическое картографирование, экзогенный морфогенез, эндогенный морфогенез, антропогенный морфогенез.

DOI: 10.31857/S086958732206010X

ШВАРЕВ Сергей Валентинович — кандидат технических наук, заведующий лабораторией геоморфологии ИГ РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмической опасности ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. ГОЛОСОВ Валентин Николаевич — доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник лаборатории геоморфологии ИГ РАН. ЛЕБЕДЕВА Екатерина Владимировна — кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоморфологии ИГ РАН. ЛИХАЧЁВА Эмма Александровна — доктор географических наук, главный научный сотрудник лаборатории геоморфологии ИГ РАН. ХАРЧЕНКО Сергей Владимирович — кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ им. М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник лаборатории геоморфологии ИГ РАН.

Более 100 лет назад началось научное осмысление глобальной роли человека в развитии природы. Зачинателями этого направления стали авторы концепций антропосферы Д.Н. Анучин и ноосферы В.И. Вернадский. В последнее время масштабные последствия деятельности человека связывают с происходящими климатическими изменениями – глобальным потеплением, таянием ледников, деградацией мерзлоты, участвующими ураганами, ожидаемым подъёмом уровня океана и пр. На этом фоне пока ещё гипотетического воздействия несколько в тени остаётся активное фактическое влияние деятельности человека на литосферу, прежде всего на рельеф, являющийся, по сути, условием самого существования человека. Именно геологическая деятельность людей определила ноосферные воззрения В.И. Вернадского, а понятие “техногенез” впервые введено А.Е. Ферсманом для сферы взаимодействия человека с литосферой.

С конца XIX в. резко увеличилось воздействие человека на рельеф и подстилающий субстрат (в современном понимании – на морфолитосистемы). Превышение объёма техногенно перемещённого материала над объёмом естественной денудации в отдельных странах уже в начале этого периода достигло нескольких раз [1]. Во второй половине XX в. объём переработанных горных пород превысил ежегодный сток всех рек на два порядка [2]. Каждый год происходят катастрофы, связанные с активизируемыми человеком естественными рельефообразующими и сопряжёнными с ними процессами: паводки и наводнения, оползни, лавины, сели, рост оврагов, размыв берегов и пр. Антропогенное воздействие не ограничивается триггерным эффектом, но обеспечивает и дополнительные факторы катастроф – наличие искусственного субстрата, потоков вещества и энергии, физических полей. Глобальный уровень антропогенного воздействия определил начало нового геологического периода – *антропоцена*, маркерами которого являются следы ядерных испытаний 1950–1960-х годов в геологических отложениях [3].

О наступлении новой эпохи наряду со стратиграфическими показателями свидетельствует множество других критериев [4]. В науке о рельефе этот этап обозначен формированием нового направления – *антропогенной геоморфологии* [5] и выдвиганием новой парадигмы, согласно которой “рельеф есть результат взаимодействия природных эндогенных и экзогенных факторов и факторов жизнедеятельности человека” [6]. Современная геоморфология – это прежде всего наука об эволюционном развитии рельефа, о его преобразовании человеком, о геоморфологических системах [7]. Геоморфология в новых условиях “продолжает развивать свою теорию, активно внедряется в практику, ищет и устанавливает

деловые контакты с другими отраслями знаний, совершенствуются методы геоморфологических исследований, появляются новые ветви и направления геоморфологии, но и в лоне старых, традиционных направлений (структурная и климатическая геоморфология, динамическая, историческая) ещё не полностью всё выяснено” [8, с. 227, 228].

НОВЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ В ГЕОМОРФОЛОГИИ

Принципиальной особенностью развития методов геоморфологии стала возможность получения данных для количественных оценок и построений, охватывающих весь пространственно-временной диапазон, в котором функционируют объекты геоморфологических исследований: от реконструкций рельефообразования на основе глобальных и региональных моделей рельефа до исследования наноформ. Перспективные направления в развитии методов связаны с двумя основными источниками данных о составляющих предмета геоморфологии – рельефе и субстрате, объединяемых понятием “морфолитосистемы”. Во-первых, получение новых детальных данных о форме поверхности, которое обеспечивается бурно развивающимися дистанционными методами: высокоразрешающими космическими изображениями, лазерными, сканерными, радарными, акустическими, ультразвуковыми датчиками, с помощью которых оказалось возможным построение 3D-моделей рельефа, в том числе ранее недоступного глазу, – укрытого густой растительностью или мощной толщей воды в практически любом масштабном диапазоне. Во-вторых, исследование свойств рельефообразующих горных пород и отложений как путём применения новых дистанционных геофизических технологий, так и контактных методов, касающихся свойств субстрата, прежде всего изотопных, позволяющих оценить возраст, объём и скорость осадконакопления, денудации или собственно рельефообразования. Новые данные требуют и новых методов их обработки, математического моделирования и картографического представления.

Космические снимки высокого разрешения. Традиционно важную роль при проведении дистанционных исследований, подготовке рекогносцировочных и собственно полевых работ, а также в камеральной обработке их результатов играют космические снимки. Особый интерес для геоморфологов представляет сравнительно новая технология *радиолокационной интерферометрии* (InSAR, IfSAR), активно развивающаяся с запуском в 2014 г. спутников Sentinel-1 [9]; она позволяет как строить цифровые модели высот на основе фазового сдвига вернувшейся на спутник радиоволны, обусловленного разной абсолютной

высотой отражающей поверхности, так и отслеживать по разновременным радарным изображениям с высокой временной дискретизацией динамику отметок высот на обширных территориях. Данный метод активно используется для мониторинга оползней, просадочных явлений, оценки последствий землетрясений и вулканических извержений и т.д. [10]. При этом предельная точность регистрации изменений высот может достигать половины длины радиоволны, то есть иметь субсантиметровые значения [11]. Обработка долговременных рядов снимков Sentinel-1, а также более ранних и с худшим разрешением (Alos Palsar и др.) позволит выйти на качественно новый уровень составления экзоморфодинамических карт.

Цифровые модели рельефа (ЦМР). Важная часть современных геоморфологических исследований – использование цифровых моделей высот и глубин. Толчком к этому стало появление свободно распространяемых глобальных продуктов – сначала SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), затем Aster GDEM, Alos World 3D. Широкие возможности для работы в арктическом регионе обеспечила модель высот ArcticDEM [12] с детальностью 2 м/пикс. Ранее цифровые модели высот подобной детальности можно было получить только путём фотограмметрической обработки стереопар сверхвысокодетальных космических снимков (с коммерческих аппаратов WorldView, GeoEye, Pleiades и др. с разрешением ≤ 1 м) либо благодаря собственной наземной или воздушной съёмки земной поверхности.

Цифровые модели высот позволяют проводить морфометрический анализ рельефа, извлекать из этих данных как стандартные характеристики (размах высот и их площадное распределение, построение гипсографических кривых, распределение склонов по крутизне и экспозиции и др.), так и решать более узкие задачи – производить имитационное моделирование стока воды и наносов, денудации и аккумуляции [13]. По ЦМР производятся автоматизированные инженерные оценки рельефа [14], поиск оптимальных трасс линейных сооружений по геолого-геоморфологическим критериям и т.д.

Беспилотные летательные аппараты. На методике полевых геоморфологических исследований значительно повлияло широкое распространение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основное назначение БПЛА в работе геоморфолога – получение цифровых моделей местности и ортофотопланов высокого разрешения, достигающего миллиметров при съёмке с небольшой высоты. Планы используются преимущественно для дешифрирования контуров проявления экзогенных процессов, в то время как цифровые модели местности (ЦММ) предназначены для морфометрического анализа микро- и нанорельефа. Точная

привязка позволяет производить сопоставление разновременных ЦММ, расчёт объёмов денудации и аккумуляции и интерпретацию изменений в морфологии земной поверхности как следствий различных геоморфологических процессов.

Математическое моделирование. Сейчас наблюдается новый виток роста интереса к математическим методам и моделированию в геоморфологии. Выделяются три основных направления математического моделирования в изучении рельефа: автоматизированное распознавание отдельных форм и комплексов рельефа; моделирование развития земной поверхности во времени (в 2D – по профилю, в 3D – на площади); математическое моделирование механизмов геоморфологических процессов. С первым направлением связан поиск математических индикаторов, сигнатур отдельных форм и целых генетических типов рельефа на ЦМР для целей частичной автоматизации геоморфологического картографирования. Здесь подразумеваются как кластеризация земной поверхности по различным индикаторам, успешно применённая, например, в работах по выделению экзодинамических режимов, так и классификация с обучением. Становится возможным обучить статистическую модель проведению границ, взяв в качестве обучающих данных готовые геоморфологические карты и растровые модели различных морфометрических характеристик рельефа, векторные границы геологических разностей, результаты аэрогеофизической съёмки и пр.

Автоматическое картографирование. Классическое геоморфологическое картографирование – создание карт, отражающих морфологические, генетические, возрастные, динамические или иные свойства рельефа. В то же время акценты в этой сфере смещаются на использование автоматизированных детерминистических или вероятностных алгоритмов. Классификация с обучением позволяет воспроизводить геоморфологические карты, составленные специалистами, с точностью иногда выше 80–90% на сравнительно малых обучающих выборках. К примеру, на Кольском полуострове с использованием данных по 13 типам рельефа лишь для 1.3% территории геоморфологические границы были проведены на всей площади исследования с точностью 90%, кроме того, они были экстраполированы на соседние территории, причём визуальная оценка результата позволяет говорить о высоком качестве полученной автоматически карты [15].

Изотопные методы и оценка динамики наносов. Переход к количественным оценкам темпов перераспределения наносов в пределах речных бассейнов стал во многом возможен благодаря использованию в качестве трассеров радиоизотопов искусственного и естественного происхождения. В первую очередь это радиоцезиевый метод, при-

менение которого, особенно для условий европейской территории России, наиболее продуктивно. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, на большей части этой территории зафиксированы как выпадения из атмосферы ^{137}Cs глобального происхождения, которые были связаны с проведением ядерных взрывов в открытой атмосфере в период с 1954 по 1963 г., так и с выпадениями ^{137}Cs в апреле–мае 1986 г., последовавшими вслед за аварией на Чернобыльской АЭС. Тем самым для участков аккумуляции наносов (конусов выноса и шлейфов, днищ балок, речных пойм, озёрных котловин и чаш прудов и водохранилищ) при послойном отборе накопившегося материала возникает возможность выявить пики повышенной концентрации ^{137}Cs , которые соответствуют поверхности отложений на момент выпадения ^{137}Cs в 1963 и 1986 гг.

Исследования, проведённые на ряде балочных, преимущественно пахотных водосборов, расположенных в различных ландшафтных зонах южного мегасклона Восточно-Европейской равнины, позволили обнаружить резкое сокращение темпов аккумуляции в период 1986–2018(19) гг. по сравнению с периодом 1963–1986 гг. [16], наиболее значительное на юге лесной зоны [17]. Учитывая отсутствие существенных изменений площади пашни в пределах изученных водосборов, подобное сокращение в большой мере обусловлено снижением талого смыва с пашни в связи с ростом зимних температур воздуха. Анализ изменений концентрации ^{137}Cs во времени после 1986 г. в отложениях низкой поймы по длине р. Упы позволил прийти к заключению, что тренд на снижение вклада бассейновой составляющей в сток наносов реки прослеживался и внутри временного интервала 1986–2018 гг. [18]. В данном случае использовался метод “отпечатка пальцев”, или фингерпринтинг (fingerprinting technique), который базируется на использовании набора маркеров, отличающихся друг от друга по своим физическим и/или химическим свойствам для выделения долевого вклада различных источников наносов, участвующих в формировании стока или заиления водоёма. Этот метод включает в себя различение источников отложений и распределение их доли в мелкозернистых отложениях (обычно <63 мкм), переносимых в пределах речных водосборов. Метод требует подбора трассеров, которые различаются в источниках наносов, и использования статистических процедур, что позволяет определить долевым вкладом каждого из источников в сток наносов водотока.

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОБЩЕНИЯ

Получение принципиально новых данных, применение новых методов способствуют развитию аналитических исследований в рамках трёх

направлений современного этапа развития геоморфологии – экзогенного, эндогенного и антропогенного рельефообразования – и получению синтетических оценок, подразумевающих взаимодействие составляющих морфогенеза в комплексных категориях напряжённости, опасности и риска, которые определяют устойчивое развитие человеческого общества во взаимодействии с природой.

Экзогенный морфогенез. Последние десятилетия характеризуются бурным прорывом в количественных оценках как суммарной денудации, так и интенсивности отдельных экзогенных процессов, что связано с совершенствованием традиционных методов и технологий, а также разработкой новых подходов к измерению линейных и объёмных параметров перемещения рыхлообломочного материала. Между тем любое точечное и даже площадное измерение неизбежно имеет ограничения, так как оно характеризует единичный пространственно-временной срез. В этой связи более важным, с точки зрения понимания особенностей преобразования рельефа, является выявление трендов изменений скоростей процессов, а в идеале – их цикличности во времени. Последнее в настоящий момент представляется задачей скорее будущих исследований, так как пока имеются ограниченные во времени ряды наблюдений за процессами денудации и аккумуляции или же их временное разрешение остаётся достаточно грубым. Дополнительные возможности для оценки темпов денудации и трендов их изменений на обширных пространствах даёт использование эрозионных моделей, а также результаты многолетних наблюдений за стоком наносов на гидрологических постах. Процесс водной эрозии на пашне определяет современные темпы денудации равнин умеренного пояса, включая Восточно-Европейскую равнину. Оценки современной интенсивности смыва почв на пашне, выполненные для Европейской территории России для двух временных срезов, позволили выявить отчетливую тенденцию снижения суммарных объёмов перемещённого материала почти вдвое в 2012 г. по сравнению с 1980 г. (см. табл. 1) [19].

Расчётные данные в целом хорошо согласуются с результатами полевых исследований, проводившихся на малых пахотных водосборах, расположенных в различных ландшафтных зонах ЕТР [17 и др.]. Следует учитывать, что около 80–90%, а в лесной зоне и больше, наносов, сформировавшихся за счёт смыва на пашне, переотлагаются внутри водосборов и не поступают в постоянные водотоки. Оценка выноса материала за пределы определённого створа речного бассейна может быть получена по объёмам отложений в водохранилищах. Подобные исследования, проведённые для Щёкинское водохранилища, в котором отлагаются наносы верхнего течения р. Упы (при-

Таблица 1. Расчётные темпы среднегодового смыва почв и суммарные объёмы перемещённых наносов на пахотных землях Европейской территории России за два временных среза (по [19] с модификациями)

Ландшафтные зоны Восточно-Европейской равнины	Среднегодовые темпы эрозии на пашне, мм		Изменения среднегодовых темпов эрозии, %	Суммарные объёмы перемещённых наносов, 10 ³ т		Сокращение суммарных объёмов перемещённых наносов, %
	1980 г.	2012 г.		В 1980 г.	В 2012 г.	
Лесная	6.1	3.4	–44	151 163	37 791	75
Лесостепная	3.4	2.8	–17	136 450	79 277	42
Степная	3.3	3.8	+15	148 618	127 663	14
Всего				436 231	244 731	44

ток р. Оки) позволил оценить слой денудации для данного водосбора за постчернобыльский период, который составил 2.7 мм за 32 года [18], или около 0.08 мм/год. Данную величину следует признать относительно невысокой для этого водосбора со значительной долей пашни, учитывая, что она включает, помимо смыва с пашни, и продукты линейных и русловых размывов. В среднем слой денудации для пахотных чернозёмных почв составляет 0.5 мм/год за весь период интенсивного землепользования, а для ряда регионов (Ростовская область) – и 1.1 мм/год [20].

В горах темпы денудации существенно различаются по высотным зонам. Наиболее активно они протекают в прогляциальной зоне. Так, исследования, проводившиеся на водосборе р. Джанкуат, позволили установить, что средний слой денудации за пятилетний период наблюдений составил не менее 0.43 мм/год [21]. При этом не учитывался объём выноса донных отложений, который, согласно имеющимся представлениям, составляет не менее 20% от суммарного стока наносов. В среднем слой денудации для Большого Кавказа и Закавказья, установленный на основе использования данных по стоку наносов рек, составляет 0.17 мм/год с максимумом 1.55 мм/год [22].

Эндогенный морфогенез. В рамках исследования эндогенной составляющей морфогенеза выделяются проблемы, связанные с вулканогенным и сейсмогенным рельефообразованием как в высшей степени динамичными и опасными для человеческой деятельности процессами.

Вулканогенный морфогенез. Ранее геоморфологические исследования в вулканических регионах были связаны преимущественно с картографированием, а влияние вулканизма на ход экзогенных процессов рельефообразования рассматривалось в основном с точки зрения литологического фактора. В настоящее время геоморфологов привлекает проблема воздействия вулканизма на характер развития всего спектра экзогенных процессов – флювиальных, склоновых, береговых, гляциальных, эоловых и др. В последние годы установлено

много специфических черт рельефообразования, в том числе связанных с формированием и перестройками речной сети: заложение русел рек в пределах потоков и покровов эффузивов за счёт разрушения приповерхностных лавоводов; наличие разновозрастных фрагментов в строении современных долин в результате многочисленных перестроек речной сети при вулкано-тектонической деятельности; активизация склоновых процессов на участках развития газогидротерм с последующим расширением долин и многие другие [23]. Так как интенсивность эндогенных процессов в вулканически активных регионах высока, то под их влиянием рельеф территории трансформируется весьма быстро и нередко кардинально: изменение топографии измеряется метрами, а в отдельных случаях – и десятками метров в год. Денудация с широким спектром эрозионных и гравитационных склоновых процессов и, как следствие, аккумуляция смещённого материала имеют не только высокие скорости, но и значительные объёмы перемещённого материала, что ведёт к быстрой трансформации исходного рельефа. Это особенно хорошо видно на примере вулканических озёр, которые стремительно – в течение месяцев – могут менять свои формы, объёмы и другие параметры [24].

Речные долины вулканических регионов являются зонами быстрой эндогеннообусловленной аккумуляции ювенильного и резургентного материала в результате эффузивных или эксплозивных извержений, вулкано-тектонических, газогидротермальных и грязевулканических проявлений [25]. В переработке этого материала активное участие принимают не только флювиальные, но и склоновые, нивальные и эоловые процессы. Одновременно эрозионные врезки представляют собой и пути интенсивного и, как правило, импульсного перемещения вулканического материала, что наиболее часто происходит в результате схода вулканических селей. Нередко извержение провоцирует серию взаимосвязанных и последовательно развивающихся событий – цепочек из

2–3 катастрофических процессов [26]. Наблюдения показывают, что время реализации всех событий в подобных цепочках может достигать нескольких десятилетий.

Для изучения развития экзогенных процессов в условиях активного проявления эндогенной составляющей большое значение наряду с фотограмметрическими построениями и эхолотированием приобретают разновременные 3D-модели рельефа, позволяющие рассчитывать скорости и оценивать масштабы преобразований, нередко на порядок превышающих величины, наблюдаемые в невулканических регионах. Разновременные гипсобатиметрические модели кальдерного комплекса Ксудач на Камчатке дали возможность впервые охарактеризовать его строение в целом, учитывая рельеф участков, занятых озёрами. Установлено, что наиболее активными процессами рельефообразования здесь являются рост подводного вулканического купола в озере Штюбеля (до 1.6 м/год) и активный вынос пемзового материала реками в котловины озёр с формированием подводных конусов выноса [27].

Тектогенный (сейсмогенный) морфогенез. Другим актуальным направлением является изучение сейсмогенных форм рельефа. В последнее время происходит существенное изменение взглядов на геодинамику традиционно считавшихся слабоактивными платформенных территорий. Прежде всего это касается областей древних оледенений, где обнаружены многочисленные следы сильных землетрясений, связанных с гляциоизостатическими движениями. В российской части Фенноскандии систематическое изучение сейсмогенных форм рельефа позволило выделить более 20 протяжённых (до нескольких сотен километров) сейсмолинементов – активных структур, в пределах которых обнаружены очаги неоднократно повторяющихся землетрясений. Фрагменты этих структур, имеющие формальные признаки активных разломов, включены в созданную недавно международную базу данных [28]. Для одного из таких участков установлены признаки сильнейшего ($I_0 = 10$; $M = 8$) из известных до сих пор раннеголоценовых землетрясений в центральной Карелии [29].

Появляются доказательства и становится всё более очевидным, что сейсмическая активность является одним из ведущих факторов развития природы в позднеледниковье-голоцене, влияя на трансгрессии и регрессии озёрных бассейнов, катастрофические прорывы и перестройки гидрографической сети [30]. Меняются представления и о генезисе, казалось бы, типичных форм рельефа, обнаруживающих не только ледниковые, мерзлотные, водно-ледниковые и иные признаки, но и следы сейсмических воздействий [31]. Возможности высокоразрешающих цифровых моделей (ArcticDEM, AsterGDEM) позволяют

по-новому рассмотреть блоковую морфоструктуру, обнаруживающую сопряжённые признаки эндогенной и экзогенной активности, и параметризовать её в соответствии с известными соотношениями для сейсмогенерирующих разломов, определив для Кольского полуострова зоны с различной степенью активности на уровне магнитуд 6.5–7.5 в течение позднеледниковья и голоцена [32]. Региональные морфотектонические построения дают возможность учитывать активную блоковую тектонику для палеогеографических реконструкций. Использование современных инструментальных средств определения возраста – ещё один ключевой элемент исследований сейсмогенного рельефа и отложений. Сопряжённое применение радиоуглеродного и оптико-люминесцентного датирования в зоне влияния активизированного Вуоксинского разлома на Карельском перешейке позволило установить восемь сильных землетрясений, из которых три относятся к послеледниковому времени, а пять распределены в интервале 16–90 тыс. лет назад [33]. Полученные данные свидетельствуют о повторяемости платформенных землетрясений с интервалом от 2 до 10 тыс. лет вне прямой зависимости от гляциоизостазии. Следы ещё более древних землетрясений обнаружены на Самбийском (Калининградском) полуострове. Здесь изучены деформации разного типа в отложениях всего позднего плейстоцена. На основе сопоставления следов землетрясений и стратиграфических признаков отложений установлено девять этапов осадконакопления, сопряжённых с шестью этапами тектонической активизации за последние 300 тыс. лет [34].

Антропогенный морфогенез. В серии работ лаборатории геоморфологии ИГ РАН обоснованы концепции актуальности перехода современных геоморфологических исследований к изучению экологических и инженерных свойств рельефа и о современном рельефе как результате взаимодействия не только эндогенных и экзогенных естественных факторов, но и деятельности человека [6]. Эта концепция легла в основу представлений об *антропогенно-геоморфологических системах* (АГМС) и их “организованности” как упорядоченном и согласованном пространственном строении [35]. Принципы и технологические основы управления АГМС опираются на алгоритм “моделирование–мониторинг–управление”, являющийся необходимым условием устойчивой работы системы [36]. Они ориентированы прежде всего на решение проблем безопасности на основе комплексирования: оценки опасности и риска природных процессов по отношению к инженерным сооружениям; оценки опасности и риска техногенных воздействий на природные комплексы. Другой аспект изучения природно-антропогенных взаимодействий в рамках АГМС – оценка рельефа как ресурса для рационального освоения

территории. Исследования, включающие рисковую и ресурсную составляющие, проведены на территории Новой Москвы, которая представляет собой пример массового разнотипного, разно-масштабного и зачастую спонтанного освоения. Моделирование на основе детальной базы данных [37] позволило дифференцировать территорию по уровням геотехнического и геоэкологического риска и культурно-эстетического восприятия рельефа как одного из типов геоморфологических ресурсов [38] и определить чёткие критерии освоения территории по типам и уровням воздействия.

Синтетические оценки. Природные и антропогенные изменения факторов денудации. Значительное сокращение площади пашни, особенно в лесной зоне ЕТР, произошедшее в период с начала 1990-х и до конца 2010-х годов, привело к уменьшению объёмов смыва на 75% по сравнению с началом 1980-х годов [20]. Другим важным фактором, в наибольшей мере повлиявшим на снижение темпов смыва, явилось повышение температуры воздуха в зимнее время, что привело к существенному снижению глубины промерзания почв и, как следствие, к сокращению поверхностного стока и смыва в период снеготаяния. Оба фактора ещё в более значимой степени сказались на темпах линейного прироста оврагов и образования новых линейных эрозионных форм [39]. Детальный анализ изменений темпов смыва в пределах речных бассейнов различных ландшафтных зон позволил установить, что на сокращении темпов смыва также сказался вывод из-под пашни наиболее крутых склонов междуречных пространств [40]. В горах Кавказа воздействие антропогенного фактора на усиление процессов денудации гораздо более локализовано, но объёмы перемещённого материала при этом возрастают в разы [41]. Основное влияние на интенсивность денудации в различных высотных зонах Кавказа и Закавказья оказывают топографические факторы, пространственное распространение которых контролируется сейсмотектонической активностью. Немаловажное влияние на активность экзогенных процессов оказывает соотношение площадей с различным проективным покрытием поверхности склонов [42].

Геоморфологическая напряжённость. Освоение всё новых регионов на фоне меняющихся природных условий увеличивает потребность в прогнозе природных катастроф. В связи с этим встаёт вопрос оценки потенциальной предрасположенности территорий к тем или иным опасным геоморфологическим событиям. В начале 2000-х годов появился термин “susceptibility” — предрасположенность (чувствительность) территории к какому-либо опасным процессам. Обычно это понятие применяется по отношению к какому-то одному процессу. В отечественной науке его ана-

логом стал термин “геоморфологическая напряжённость”, причём в России наметилась тенденция оценки территории по *комплексу негативных явлений рельефообразования*, поскольку не столь опасные по отдельности, во взаимодействии они приводят к масштабным катастрофическим последствиям. На основе оценки внешних и внутренних факторов рельефообразования выделяются зоны *повышенной геоморфологической напряжённости* — территории, предрасположенные к катастрофическому развитию процессов, для которых типично: развитие одной или нескольких рельефообразующих тенденций, которые могут приобретать катастрофический характер; периодическое воздействие внешних факторов, провоцирующих экстремальное развитие фоновых процессов; преобладание рельефа, который способствует экстремальным трансформациям и характеризуется высокими скоростями рельефообразования [43].

Геоморфологическая напряжённость выражается через набор показателей, характеризующих как сам рельеф, так и факторы рельефообразования (экзогенные, эндогенные и антропогенные), создающие потенциал для реализации катастрофических сценариев. Показатели геоморфологической напряжённости различны при оценке потенциала на разных иерархических уровнях (масштабах картографирования) и отличаются для процессов разных генетических типов. Разработка комплексных формул геоморфологической напряжённости с вероятностной пространственно-временной оценкой катастрофических процессов при достижении пороговых (критических) значений показателей — перспективное направление синтеза геоморфологических знаний и создания нового поколения оценочных карт.

Оценка геоморфологических рисков. Особое место в современной геоморфологии занимает оценка природных рисков. Одно из её направлений — предиктивное моделирование площадного распространения того или иного процесса, например, оползней, селей, возникновения карстовых провалов и т.д. Принцип, положенный в основу предиктивного моделирования в геоморфологии [44], включает следующие этапы: инвентаризацию проявлений геоморфологического процесса; подбор показателей предполагаемых факторов; создание обучающей выборки, включающей сбалансированные по количеству данные по участкам с проявлениями искомого процесса и участкам без таковых проявлений; поиск характеристик, позволяющих наилучшим образом последовательно сепарировать данные в классы “опасный” и “безопасный”; экстраполяцию полученных закономерностей на всю площадь обследуемого участка. Подобная работа была проведена нами для территории пос. Красная Поляна (Краснодарский край) и его окрестностей (пло-

шадь ≈ 500 км²), характеризующейся широким распространением оползней мелкого заложения, связанных с общей высокой расчленённостью рельефа, большим количеством осадков, близостью к поверхности локальных водоупоров во флишах [45]. Для обучения модели использованы 183 оползня. Достигнута высокая точность (73%) распознавания фактически оползневых участков. Добавление в модель спектральных характеристик рельефа [46], отвечающих тому или иному рисунку топографического расчленения, усилило предсказательную способность модели до 76%. Индуктивный подход (от реальных проявлений процесса к его прогнозу) имеет преимущества перед более традиционными дедуктивными подходами к оценке геоморфологических опасности и риска. Оценка опасности, основанная на фактических проявлениях того или иного геоморфологического процесса, не требует относительного взвешивания факторов. Всё это обуславливает постепенное смещение оценок геоморфологических опасностей и рисков в сторону использования индуктивных моделей с последующей полевой или дистанционной (радарная интерферометрия) верификацией результатов.

* * *

Прогресс в развитии геоморфологических исследований опирается на использование новых методов, направленных на получение количественных, пространственных и временных показателей рельефа и рельефообразующих процессов, математическую обработку данных с представлением результатов анализа в виде многоцелевых моделей, а также на развитие теоретических представлений в рамках интеграции экзогенного, эндогенного и антропогенного морфогенеза. Не стоит забывать, что факторы морфогенеза реализуются на поверхности планеты как космического тела. В каждом из них заложена космическая составляющая, как в виде собственно планетарных свойств, так и внешних воздействий других космических тел. Это перспективное направление исследований носит не только фундаментальный теоретический характер, касающийся раскрытия общих закономерностей морфогенеза, но и имеет практические следствия с точки зрения изучения механизмов современных процессов, понимания катастроф прошлого и прогноза на будущее.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119021990091-4 (FMGE-2019-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sherlock R.L.* Man as a Geological Agent, an Account of His Action on Inanimate Nature. London: H.F. and G. Witherby, 1922.
2. *Szabó J. et al.* (eds.). Anthropogenic Geomorphology. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3058-0_1, Springer Science+Business Media B.V. 2010.
3. *Crutzen P.J., Stoermer E.F.* The Anthropocene // Global Change Newsletter. 2000. V. 41. P. 17–18.
4. *Waters C.N., Zalasiewicz J.A., Williams M., Ellis M., Snelling A.M.* (eds). A Stratigraphical Basis for the Anthropocene // Geological Society Special Publication. 2014. № 395.
5. *Fels E.* Anthropogene geomorphologie // Seieta. 1957. V. 92. № 10. P. 225–260.
6. *Лихачёва Э.А., Тимофеев Д.А.* Экологическая геоморфология. Словарь-справочник. М.: Медиа-ПРЕСС, 2004.
7. Современная геоморфология / Отв. ред. В.М. Котляков, ред. В.В. Бронгулеев, А.Н. Маккавеев, Э.А. Лихачёва. М.: Издательский дом “Кодекс”, 2015.
8. *Тимофеев Д.А.* Размышления о фундаментальных проблемах геоморфологии. Избранные труды. М.: Медиа-ПРЕСС, 2011.
9. *Raspini F., Bianchini S., Ciampalini A. et al.* (2018). Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites // Scientific reports/ 2018. № 8 (1). P. 1–11.
10. *Smith L.C.* Emerging applications of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in geomorphology and hydrology // Annals of the Association of American Geographers. 2002. № 3. P. 385–398.
11. Sentinel-1 – Overview. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>. (дата обращения 10.11.2021).
12. ArcticDEM – Polar Geospatial Center. <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (дата обращения 20.12.2021).
13. *Харченко С.В.* Новые задачи морфометрии рельефа и автоматизированные морфологические классификации в геоморфологии // Геоморфология. 2020. № 1. С. 3–21.
14. *Харченко С.В.* Морфометрическая обусловленность застройки крупных городов Черноземья // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2013. № 2. С. 71–78.
15. *Kharchenko S.V.* Automatic recognition of exogenic landform types on the arctic terrain using spectral geomorphometric variables (example of the European part of the Russia) // Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. V. 19. B.2.1. Section Cartography and GIS. Albena (Bulgaria), 2019. P. 785–792.
16. *Golosov V., Koiter A., Ivanov M. et al.* Assessment of soil erosion rate trends in two agricultural regions of European Russia for the last 60 years // Journal of Soils and Sediments. 2018. V. 18. № 12. P. 3388–3403.
17. *Gusarov A.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., Sharifullin A.G.* Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia // Geomorphology. 2019. V. 327. P. 230–247.

18. *Golosov V.N., Ivanov M.M., Tsyplenkov A.S. et al.* Erosion as a Factor of Transformation of Soil Radioactive Contamination in the Basin of the Shchekino Reservoir (Tula Region) // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 54. № 2. P. 291–303.
19. *Golosov V., Yermolaev O., Litvin L., Chizhikova N., Kiryukhina Z., Safina G.* Influence of climate and land use changes on recent trends of soil erosion rates within the Russian Plain // *Land Degradation and Development*. 2018b. V. 29. № 8. P. 2658–2667.
20. *Golosov V.N., Collins A.L., Dobrovolskaya N.G. et al.* Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture // *Geoderma*. 2021. V. 381. Article number 114678.
21. *Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Collins A.L. et al.* Elucidating suspended sediment dynamics in a glacierized catchment after an exceptional erosion event: The Djankuat catchment, Caucasus Mountains, Russia // *Catena*. 2021. № 203. Article number 105285.
22. *Tsyplenkov A., Golosov V., Vanmaercke M.* Contemporary suspended sediment yield of Caucasus mountains // *Proceedings IAHS “Land use and climate change impacts on erosion and sediment transport”*. 2019. V. 381. P. 87–93.
23. *Лебедева Е.В.* Кальдера вулкана Ксудач (Камчатка) современные процессы рельефообразования и особенности строения долинной сети // *Геоморфология*. 2017. № 3. С. 60–75.
24. *Козлов Д.Н., Лебедева Е.В.* Кратерные и кальдерные озёра Дальнего Востока России: морфология котловин и особенности развития // *Известия РАН. Серия географическая*. 2022. Т. 86. № 2. С. 204–219.
25. *Лебедева Е.В.* Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф // *Геоморфология*. 2019. № 4. С. 49–66. <https://doi.org/10.31857/S0435-42812019449-66>
26. *Лебедева Е.В.* Цепочки катастрофических геоморфологических процессов в речных долинах вулканических регионов // *Геоморфология*. 2018. № 4. С. 38–55.
27. *Kharchenko S.V., Kozlov D.N., Lebedeva E.V.* Hypsometric models of caldera complex Ksudach (Kamchatka) // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020. V. 459. № 1. Article number 022066.
28. *Nikolaeva S.B., Nikonov A.A., Shvarev S.V.* Lateglacial and postglacial faulting in the Russian part of the Fennoscandian shield // *Glacially-Triggered Faulting*. United Kingdom, 2021. P. 246–260.
29. *Шварев С.В., Родкин М.В.* Структурная позиция и параметры палеоземлетрясений в районе горы Воттоваара (Средняя Карелия, восточная часть Фенноскандинавского щита) // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2017. Т. 44. № 2. С. 35–60.
30. *Subetto D., Shvarev S., Nikonov A. et al.* New evidence of the Vuoksi river origin by geodynamic cataclysm // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2018. V. 90. P. 275–289.
31. *Шварев С.В.* Постледниковые сейсмогенные деформации озовой гряды в северной части Карельского перешейка // *Геоморфология*. 2019. № 3. С. 19–35.
32. *Шварев С.В.* Морфотектоника, сейсмичность и экзогенные процессы Кольского полуострова // *Геология и геофизика*. 2022 (Препринт DOI: 10.15372/GiG2021126).
33. *Шварев С.В., Субетто Д.А., Зарецкая Н.Е., Молодьков А.Н.* Возраст, генезис и сейсмогенные деформации террас реки Вуокса на Карельском перешейке, Северо-Запад России // *Геология и геофизика*. 2021. № 11. С. 1592–1615.
34. *Шварев С. В.* Морфотектоника, деформации рыхлых отложений и этапы тектонической активизации Самбийского (Калининградского) полуострова в позднем плейстоцене и голоцене // *Геоморфология*. 2021. № 4. С. 97–124.
35. *Лихачёва Э.А., Тимофеев Д.А.* К иерархии геоморфологических систем с позиций их организованности // *Геоморфология*. 2007. № 4. С. 3–8.
36. *Лихачёва Э.А., Шварев С.В., Аникина Н.В.* Геоморфологическая оценка территориальных ресурсов Новой Москвы // *Геоморфология*. 2015. № 1. С. 77–88.
37. *Аникина Н.В., Шварев С.В., Неходцев В.А., Самойлова Е.А.* Оценка природно-антропогенных геолого-геоморфологических условий Новой Москвы // *Геоэкологические проблемы Новой Москвы: Сборник научных трудов / Отв. ред. А.В. Кошкарёв, Э.А. Лихачёва, А.А. Тишков*. М.: Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 88–95.
38. *Шварев С.В., Лихачёва Э.А., Аникина Н.В., Некрасова Л.А.* Оценка организованности антропогенно-геоморфологических систем Новой Москвы на основе синтеза экспертных и статистических оценок // *Геоморфология*. 2017. № 2. С. 25–37.
39. *Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Зайцева М.Ю.* О причинах современного сокращения темпов роста оврагов в Удмуртии // *Геоморфология*. 2018. № 1. С. 75–87.
40. *Mal'tsev K.A., Ivanov M.A., Sharifullin A.G., Golosov V.N.* Changes in the Rate of Soil Loss in River Basins within the Southern Part of European Russia // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. № 6. P. 718–772.
41. *Shvarev S.V., Kharchenko S.V., Golosov V.N., Uspenskii M.I.* A Quantitative Assessment of Mudflow Intensification Factors on the Aibga Ridge Slope (Western Caucasus) over 2006–2019 // *Geography and Natural Resources*. 2021. V. 42. № 2. P. 122–130.
42. *Golosov V., Tsyplenkov A.* Factors Controlling Contemporary Suspended Sediment Yield in the Caucasus Region // *Water*. 2021. № 13. P. 3173.
43. *Лебедева Е.В., Шварев С.В., Готванский В.И.* Природно обусловленная напряжённость геоморфологических процессов территории Дальнего Востока России // *Геоморфология*. 2014. № 4. С. 48–59.
44. *Wilcock P.R., Iverson R.M.* Prediction in geomorphology. *American Geophysical Union*, 31. 2003.
45. *Харченко С.В., Шварев С.В.* Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // *Вестник Московского университета*. Сер. 5. География. 2020. № 3. С. 22–33.
46. *Shvarev S., Golosov V., Kharchenko S.* Landslide susceptibility prediction by supervised Kohonen network on classic and spectral geomorphometric variables (case study of the Krasnaya Polyana resort, Russia) // *European Geosciences Union General Assembly 2020*. V. 22 of Geophysical Research Abstracts. Germany, 2020. P. 20234.