

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2024 г. Е.А. Вознесенский^{a,b,*}

^aИнститут геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

^bГеологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: eugene@geoenv.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 18.07.2024 г.

В статье рассматриваются закономерности распространения проявлений опасных геологических процессов на территории России и вопросы их прогнозирования. Показано, что локальный прогноз развития опасных процессов всегда направлен на конкретный объект, явление или группу явлений в пределах ограниченных территорий и подразумевает расчёт параметра, характеризующего устойчивость массива грунтов, для чего непременно применяется расчётная модель. Успех прогноза зависит от качества модели и достоверности введённых в неё экспериментальных параметров. При детерминированном расчёте для минимизации числа возможных следствий очевидным или неочевидным образом пренебрегают вариативностью причин, вызывающих опасный процесс. В вероятностном варианте с помощью обычного перебора рассматривается большее количество возможных сочетаний действующих факторов. К сожалению, нельзя утверждать, что это повышает надёжность расчётов, поскольку их точность зависит от качества используемой расчётной модели и учёта неоднородности среды.

Ключевые слова: опасные процессы, оползень, карст, геокриологические опасности, радон, геологический риск, прогноз, модель.

DOI: 10.31857/S0869587324080061, EDN: FCPBJA

Острейшая проблема современной цивилизации – осмысленное взаимодействие человеческого общества со средой его обитания, познание законов и последствий этого взаимодействия. Планирование потребления природных ресурсов уже не может основываться лишь на экономике, но требует моделирования природопользования в целом с учётом социальных и управленческих аспектов для разработки долгосрочной стратегии существования цивилизации.



ВОЗНЕСЕНСКИЙ Евгений Арнольдович – доктор геолого-минералогических наук, директор ИГЭ РАН, профессор геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Как предсказывал В.И. Вернадский, человек стал значимой геологической силой: огромны объёмы переваливаемых им горных пород при разработке полезных ископаемых (порядка 200 т на каждого жителя планеты в год, и это только в горнодобывающей отрасли, без учёта строительной), объёмы созданных в северном полушарии водохранилищ уже влияют на прецессию земной оси, а следовательно, и на темпы изменения климата. Логистические коридоры, по которым перемещаются ресурсы общества, многократно превышают окружность планеты. Так, протяжённость автомобильных дорог только России превышает 1.5 млн км, хотя по этому показателю наша страна находится лишь на 5-ом месте в мире. А есть ещё железные дороги, водные пути, трубопроводный транспорт, линии электропередач.

Таким образом, современная цивилизация не просто извлекает полезные ископаемые и возводит всё более сложные инженерные сооружения, она использует литосферу практически в целом как свой жизнеобеспечивающий ресурс.

Геологические процессы – неотъемлемая часть реакции литосферы на нарушение её равновесия как

за счёт присущей ей природной динамики (тектонические движения, деятельность рек, выветривание), так и в результате техногенных воздействий, когда она реагирует на вмешательство человека.

Проблема понимания природы и закономерностей развития геологических процессов в значительной мере связана с невозможностью прямого наблюдения за ними: в процессы вовлекаются массивы грунтов, а судим мы о них, давая в том числе и количественные оценки, по проявлениям на поверхности. Процесс реконструируется, а, по сути, моделируется, либо по данным из отдельных точек, например скважин, либо по площадным изменениям на поверхности, в том числе по результатам дистанционного зондирования Земли, либо по изменениям параметров полей Земли с привлечением геофизических методов. Мониторинг процессов – это, по существу, наблюдения за их проявлениями опять же на поверхности или в отдельных её точках.

Критерием корректного понимания механизма и достаточной в практическом отношении изученности любого геологического процесса выступает надёжность прогноза его развития. Решение именно прогнозной задачи характеризует наши возможности предвидеть и предотвращать – инженерным или иным путём – неблагоприятные последствия опасных геологических процессов. Цель настоящей статьи – показать состояние исследований в этой научной области. Россия – огромная страна, а потому на её территории в той или иной мере проявляются, вероятно, все известные геологические процессы. В связи с этим остановимся лишь на некоторых их

группах, имеющих большое значение для проживания людей и функционирования инфраструктурных объектов.

СКЛОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Начать следует со склоновых процессов. О важности их специализированного изучения для человеческого общества свидетельствует количество научных исследований по этой тематике. Так, на последнем инженерно-геологическом конгрессе в Чэнду (Китай, сентябрь 2023 г.) доля соответствующих докладов составила 60% всех научных сообщений. Примерно такая же ситуация характерна для других подобных научных мероприятий.

Изучение природы и механизмов смещения пород на склонах – важная задача современной инженерной геологии. Смещение обычно происходит под действием силы тяжести, но кинематика, объёмы и последствия бывают разными. Эти процессы приводят к формированию самостоятельного склонового ряда континентальных осадочных отложений, а также выступают важным фактором инженерно-геологических условий территории в целом. Следует учитывать, что разнообразие склоновых процессов и вызываемых ими явлений – от оползней и обвалов до каменных лавин, курумов и солюфлюкции – огромно.

Рассмотрим проблему на примере оползневых процессов, морфологическое разнообразие которых велико. Как ни странно, до сего времени не сформулировано общепринятого определе-

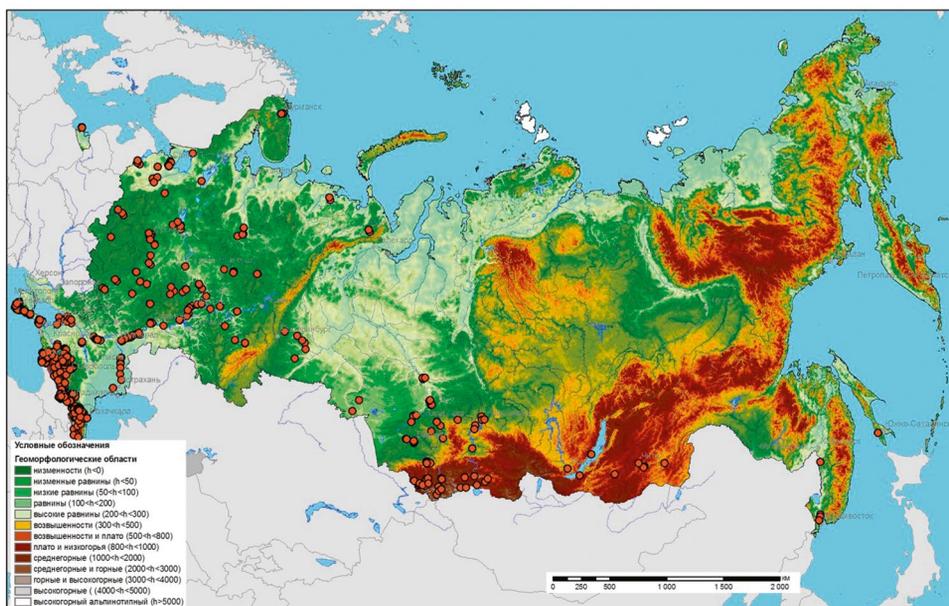


Рис. 1. Проявление активных оползней на территории России в 2020 г.

Источник: по данным государственного мониторинга состояния недр; составил кандидат геолого-минералогических наук О.В. Зеркаль.

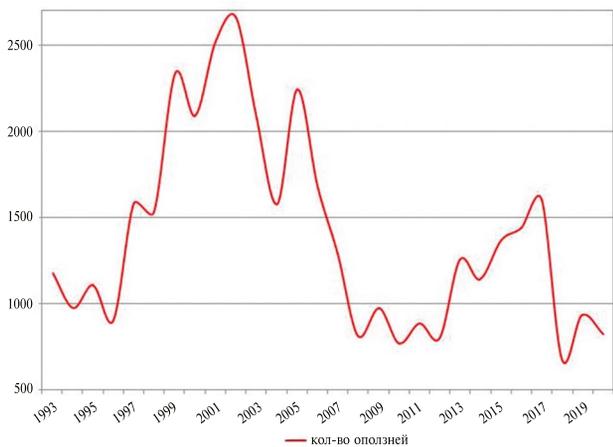


Рис. 2. Количество активных оползней на территории России в 1994–2020 гг.

Источник: по данным государственного мониторинга состояния недр; обобщены кандидатом геолого-минералогических наук О.В. Зеркалём.

ния оползня. Есть множество классификаций – по типу, механизму смещения, объёму и другим признакам, но нет единой и общей. Существуют различные подходы к предметному изучению оползней – геологический, геоморфологический, геотехнический и др. При этом разными авторами рассматривается более 20 факторов оценки регионального развития оползней, среди которых преобладающими являются состав и свойства горных пород, формирующих склон, и морфологические характеристики самого склона.

Какова же поражённость территории России оползневыми явлениями? На рисунке 1 (данные на 2020 г.) хорошо видно, что оползни концентрируются в основном в гористых районах и долинах крупных рек, что закономерно, но следует принимать во внимание и освоённость, заселённость территории. Там, где возникший даже крупный оползень не создаёт проблем человеку, он и не исследуется.

Среднегодовое количество зарегистрированных оползневых явлений на территории России составляет порядка 1500, хотя в отдельные годы отмечают

ся всплески до 2.5–2.8 тыс. (рис. 2). Этот временной ряд напоминает спектр нерегулярной динамической нагрузки, отражая сложным образом сочетающиеся вариации климата, проявления сейсмической активности и техногенные воздействия. В этом ряду выделяются, конечно, грандиозные оползни. Так, смещение Буреинского оползня 11 декабря 2018 г. привело к образованию завальной плотины высотой более 50 м и шириной до 550 м, перекрывшей долину р. Бурея, что потребовало создания искусственного прорана. А общий объём горных пород, вовлечённых в смещения на всех стадиях образования оползня, оценён суммарно в 25 млн м³ [1].

Главное в подобных ситуациях – прогноз возникновения и развития оползня, или оценка его риска. Локальный прогноз делается на основе расчёта так называемого коэффициента устойчивости склона. При этом часто отсутствует ясность положения и формы поверхности смещения, да и просто реальных границ оползневого массива.

Методы расчёта устойчивости пород на склонах весьма многочисленны – существует более 200 подходов к таким расчётам, и уже сами эти методы требуют классификации [2]. Можно выделить детерминированный и вероятностный подходы. В первом случае устойчивость определяется с использованием расчётных (статистических) характеристик. Но риск – вероятностная категория, а вероятностный анализ устойчивости основывается на получении вероятностной функции распределения коэффициента устойчивости склона в зависимости от вероятностных же функций распределения физико-механических характеристик грунтов, слагающих присклоновый массив. Основная задача такого анализа сводится к определению положения в массиве поверхности с минимальными значениями коэффициента устойчивости. Результат такого анализа зависит от выбранного метода расчёта устойчивости, количества учитываемых факторов, учёта неоднородности свойств грунтов в зоне потенциального смещения (рис. 3). Вероятность минимальна в предположении об однородности такой зоны, следовательно, важна частота опробования факторов оползнеобразования, учёта их количе-

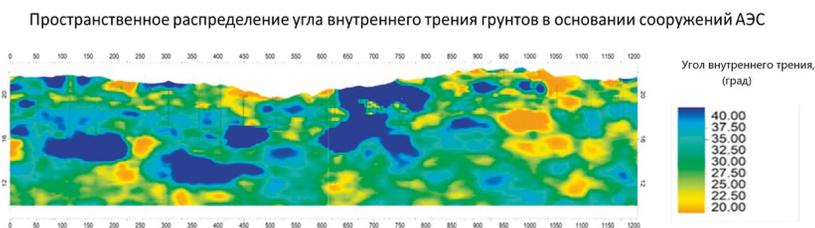


Рис. 3. Пространственное поле распределения угла внутреннего трения грунтов в основании сооружений объекта капитального строительства атомного комплекса

Источник: [3].

ства, времени реализации смещений, заложенного в рассмотрение, поскольку все факторы меняются во времени.

Итог пока неутешителен: обилие классификаций оползней свидетельствует о недостатке понимания их природы, а неумение решать прогнозные задачи — о недопонимании механизмов их развития, поэтому природа оползневых процессов остаётся актуальной проблемой не только инженерной геологии, но и геоэкологии.

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ

Характеризуя опасные процессы на территории России, около 70% площади которой занимает криолитозона, нельзя не остановиться на многочисленных геокриологических угрозах: оттаивание многолетнемерзлых грунтов и вытаивание подземных льдов, тепловые просадки и осадки сооружений, морозобойное растрескивание и пучение грунтов, наледообразование и формирование кратеров газовых выбросов. Здесь следует выделять последствия изменения свойств мерзлых грунтов, прежде всего снижение их несущей способности, и активизацию собственно геокриологических процессов, которые и служат основным источником угроз для инфраструктуры страны [4]. Их активность зависит от интенсивности изменений различных характеристик климата, но ещё более сильное воздействие оказывает реакция мерзлоты на нарушение условий теплообмена, вызываемого сооружениями.

Анализ проявлений геокриологических процессов (рис. 4) показывает, что география ущерба, сопряжённого с ними, не связана напрямую ни с геокриологическими районами, ни с темпами климатических изменений. Неблагоприятные последствия наблюдаются во всех секторах Арктики и вблизи южных границ криолитозоны во всех федеральных округах, на территории которых присутствует многолетняя мерзлота. Основные объёмы ущерба ассоциированы с длительно эксплуатируемыми сооружениями, особенно объектами линейной инфраструктуры — дорогами и трубопроводами. Этот вывод ставит на повестку дня научную задачу выработки методик содержания инфраструктурных объектов на территории криолитозоны в условиях меняющихся техногенных нагрузок и климата. Для этого требуется организовать мониторинг не только температур мерзлых толщ, но и криогенных процессов, что станет важным инструментом решения прогнозных задач.

В этой связи следует отметить пионерные работы 2022–2023 гг. Института геоэкологии РАН в сотрудничестве с Институтом мерзлотоведения СО РАН и организациями дорожной отрасли по разработке методического обеспечения организации стационарных постов мониторинга состояния мерзлых грунтов и активности геокриологических процессов на трассах федеральных автодорог в криолитозоне. На рисунке 5 представлен перечень контролируемых на таком посту параметров окружающей среды. Несколько подобных постов уже функционируют [7].

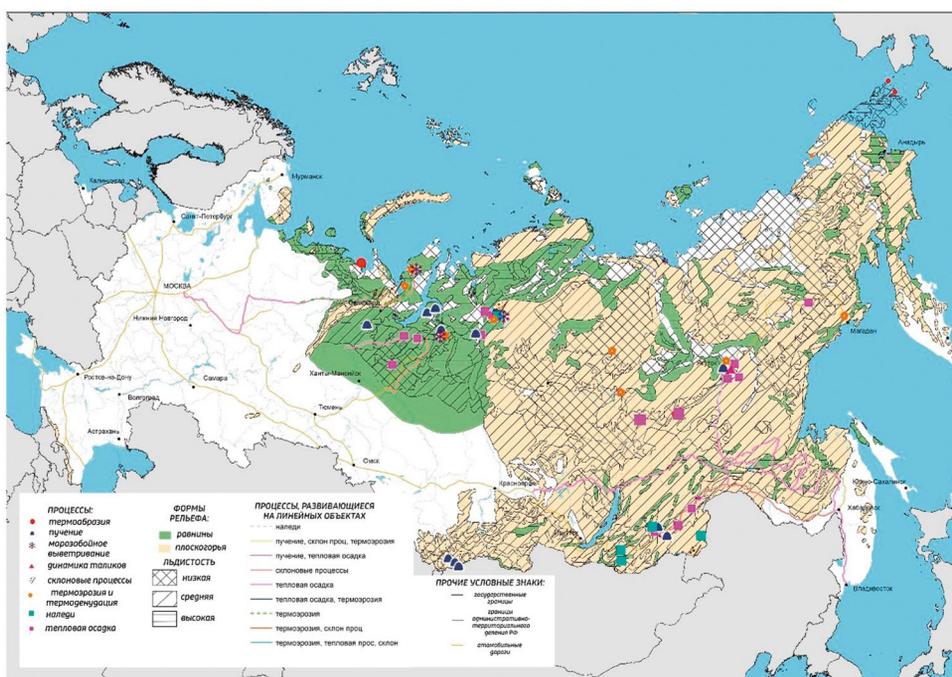


Рис. 4. Карта-схема проявлений геокриологических процессов, с которыми был сопряжён экономический ущерб за период 2000–2015 гг.

Источник: [5].

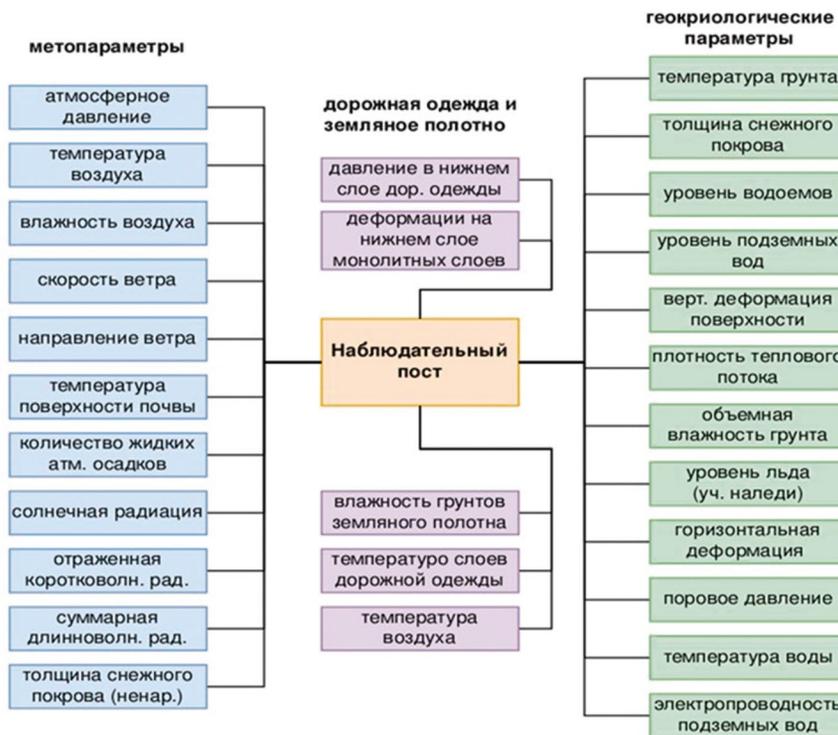


Рис. 5. Структура раздела базы данных “наблюдательный пост” на автодороге
 Источник: [6].

Полезный инструмент решения прогнозных задач – численное моделирование процессов. Так, термомеханическое моделирование позволило объяснить причину повышенной активности продольной эрозии у основания валика трубопровода. Оказалось, что эрозии способствуют не только нару-

шения поверхностного стока, обычные для линейных сооружений, но и формирование естественных дренажных канавок, связанных с тепловой просадкой поверхности [8].

Следует иметь в виду, что корректный прогноз температуры на глубине проникновения годовых



Рис. 6. Прогноз изменения температур грунта на разных глубинах для условий Центрального Ямала: сценарий RCP 8.5, глубина в метрах обозначена цветом, ненарушенные условия
 Источник: [9].

амплитуд (15–20 м) важен для проектирования, поскольку позволяет оценить, в каких температурных условиях окажутся основания сооружений на протяжении их жизненного цикла. Для оценки активности криогенных процессов в первую очередь имеет значение прогноз температурных аномалий на малых глубинах (до 10 м) (рис. 6). Например, аномально тёплые года могут привести к активизации термических просадок, холодные — к активизации пучения и наледообразования.

КАРСТ И КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЕ ПРОВАЛЫ

Закарстованные в той ли иной мере территории занимают почти треть площади суши. На схеме (рис. 7) представлены в разной степени карстоопасные районы России. Выделены и области развития этого процесса. Степень опасности охарактеризована интегрально — в баллах с учётом прежде всего поражённости территории и диаметра провалов. При таком подходе видно, что, во-первых, карстовые явления достаточно широко распространены в пределах нашей страны — они есть везде, где на небольшой глубине в зоне влияния инженерных сооружений распространены растворимые породы значимой мощности. А во-вторых, понятно, что степень опасности обусловлена сложным комплексом факторов, важнейшие из которых — геолого-структурное положение карстующихся толщ и их минеральный состав.

Карст опасен прежде всего вероятностью образования провалов приповерхностных горных пород в расположенные ниже пустоты значительного объёма с сопутствующими повреждениями сооружений. Следовательно, оценка карстовой опасности

и её прогноз заключаются в основном в установлении факта присутствия на исследуемой территории крупных подземных полостей и степени устойчивости их кровли.

Наиболее крупные карстовые полости, как следует из рисунка 8, тяготеют к районам широкого распространения дислоцированных карбонатных пород, которые вскрываются крупными речными долинами, определяющими градиенты потоков подземных вод, а также сульфатных, гораздо более высокорастворимых пород. Наиболее изучены в этом отношении пять регионов России: город Москва, Пермский край, Нижегородская область, республики Башкортостан и Крым. Эти закарстованные территории характеризуются как определённой общностью, так и резкими различиями условий, факторов развития и проявления карстовых процессов, а также связанных с ними деформаций, которые привели к формированию заметно различающихся методических подходов к оценке карстовой опасности и прогнозу возникающих явлений [11].

Карст Москвы относится к покрытому карбонатному типу, наибольшую опасность в этих условиях может вызывать образование воронок и провалов на земной поверхности и в основании сооружений. Поэтому значимыми для оценки территории по степени опасности развития таких процессов оказались области распространения доледниковой долины размыва, где главным образом распространены карбонатные породы с высокой степенью закарстованности, и мощность перекрывающих закарстованный массив относительно водоупорных глинистых отложений. Имеют значение и степень закарстованности пород, градиенты вертикальной фильтрации, степень разуплотнения покровной толщи.

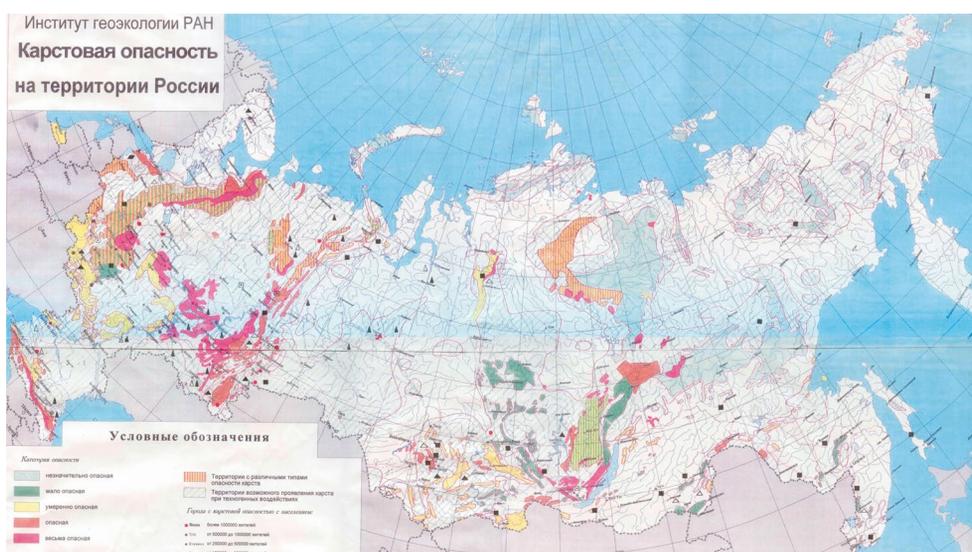


Рис. 7. Карстовая опасность на территории России

но снизить облучение населения радоном в новых зданиях, а также выявить потенциально опасные области без проведения длительных и дорогостоящих измерений радона в жилых помещениях.

Впервые карта радоноопасности России масштаба 1:10 000 000 была составлена в 1996 г. на основании геохимических данных и аэрогамма-съёмок, полученных в ходе работ по поискам урана. По мере накопления результатов измерений концентрации радона в домах появилась возможность составления карты распределения средних значений концентрации этого газа в зданиях по регионам. Карта была составлена в 2016 г. по данным Федерального банка доз облучения граждан России. Оказалось, что обе карты хорошо согласуются между собой. Регионы с наиболее высокими уровнями облучения радоном в домах в целом соответствуют наиболее потенциально радоноопасным территориям, выделенным по геолого-геохимическим признакам.

Некоторые несоответствия между потенциальной радоноопасностью и реальной концентрацией радона в домах обычно связаны с влиянием конкретной конструкции зданий. Например, в большинстве новых зданий с усиленной подземной частью и отдельными входами в подвалы, независимо от степени радоноопасности территории, радон практически не проникает из грунтов основания в помещения. Напротив, в старых зданиях при определённом режиме вентиляции может действовать своего рода насос, “подсасывающий” воздух из грунтового основания, что приводит к повышенным концентрациям радона в таких домах.

Для практических целей очень важна детальная информация о потенциальной радоноопасности территорий населённых пунктов. Однако методология и принципы детального картирования потенциальной радоноопасности в крупном масштабе пока недостаточно разработаны. Причины — отсутствие

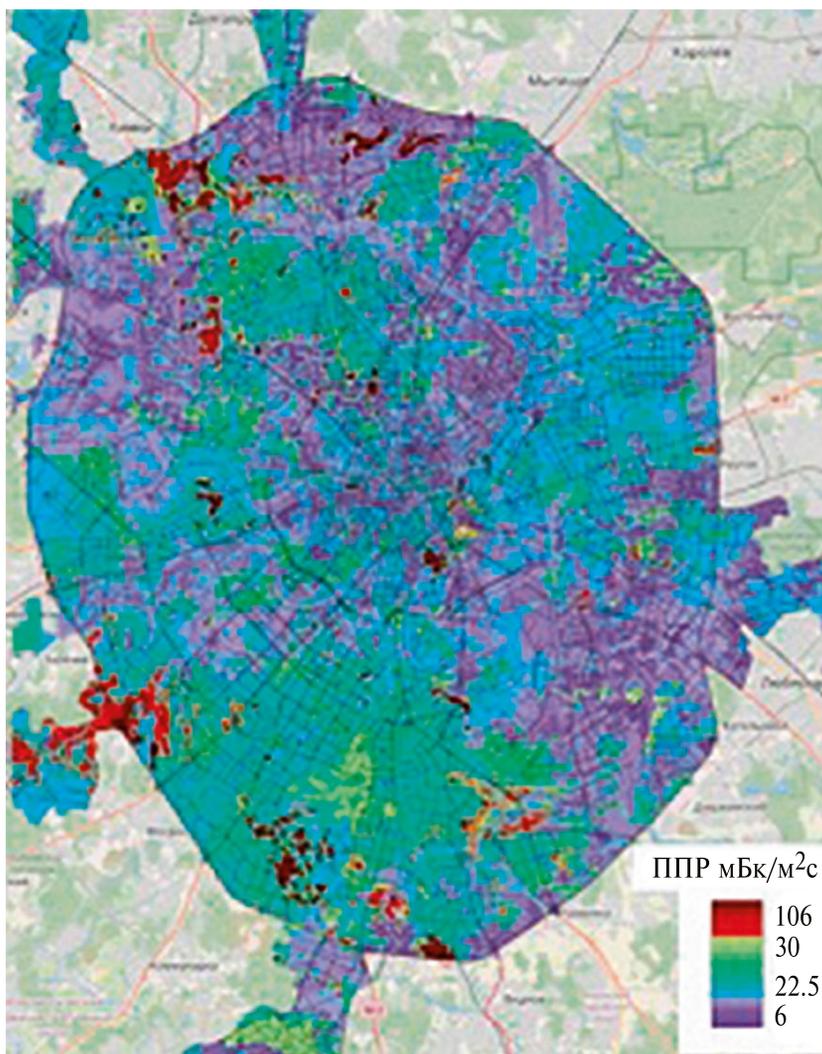


Рис. 9. Карта плотности потока радона на территории Москвы
Источник: [12].

необходимого объёма фактических данных и научно обоснованной методологии такого картирования.

ИГЭ РАН проводит исследования в этом направлении. В настоящее время для построения карт потенциальной радоноопасности территорий перспективно применение методов машинного обучения. На рисунке 9 представлен пример картирования потенциальной радоноопасности территории Москвы. При построении карты использовались материалы тематического крупномасштабного геологического картирования территории города, выполненного институтом ранее. Алгоритмы машинного обучения позволили получить достаточно детальные карты радоноопасности с учётом особенностей геологического строения территории.

В Москве низкие значения плотности потока радона соответствуют в основном долинам рек, сложенным слаборадиоактивными песчаными грунтами; более высокие значения потоков радона характерны для водоразделов, сложенных суглинками, содержащими большие концентрации урана и радия. Локальные участки с максимальными значениями плотности потока радона связаны, по-видимому, с формированием конвективных газовых потоков в зонах повышенной проницаемости за счёт перепада температур между грунтовым массивом и атмосферой. Природа этих зон повышенной проницаемости может быть разной, связанной как с геодинамически активными зонами, так и с высокопроницаемыми отложениями или с развитием суффозии вдоль подземных коммуникаций.

Во всех случаях проявления геологических рисков наиболее важной, но и самой сложной для решения оказывается прогнозная задача развития опасного процесса. Её решение подразумевает некоторую временную экстраполяцию, надёжность которой определяется полнотой изучения причин и закономерностей развития процесса. Прогноз может быть общим или локальным.

Общий прогноз, по существу, характеризует степень опасности развития неблагоприятного процесса или сочетания таких процессов на определённой территории и возможные последствия возникающих явлений. Строго говоря, такая оценка вариаций опасности во времени должна быть вероятностной. Однако невозможность одновременного учёта всех факторов развития всех идущих на конкретной территории процессов приводит к упрощению — использованию на практике неких условных, можно сказать экспертно-аналитических, интегральных характеристик (например, баллов), описывающих интенсивность их установленных проявлений — поражённость площади оползнями или карстовыми провалами, их размеры, среднее возможное количество новых проявлений в единицу времени и т.п.

Последствия процессов одинаковой интенсивности могут быть различными для территорий

с разной функциональной организацией, плотностью населения, типом существующих инженерных сооружений или угодий и другими особенностями. Они могут быть оценены через возможный ущерб, количественно характеризуемый экономическими, социальными, медицинскими или другими параметрами. Этот ущерб, следовательно, выступает оценкой уязвимости данной территории к рассматриваемому процессу или совокупности процессов.

Совместный учёт опасности природных процессов и уязвимости по отношению к ним некоторой территории позволяет перейти к оценке риска развития этих процессов. Этот риск является функцией вероятности природных опасностей, которые возможны на рассматриваемой территории, и уязвимости элементов риска, под которыми подразумевается всё, к чему применимо понятие ущерба.

В такой постановке общий прогноз опасных процессов на некоторой территории может быть дан в площадной оценке — в виде карт риска. В ИГЭ РАН разработан подход к картографированию природных рисков, которое позволяет выражать в единых количественных показателях фактическую и прогнозную информацию об опасностях любого генезиса и их последствиях для принятия научно обоснованных решений по повышению безопасности. Для этого карта опасности, например, оползневой, совмещается с картой уязвимости (плотность населения, типизация застройки, сельхозугодья и т.д.) с получением интегральной характеристики риска наступления того или иного ущерба. Этот риск в дальнейшем можно актуализировать и переоценивать с учётом новых данных по изменению суммы баллов опасности и категории риска в их пределах.

Локальный же прогноз всегда направлен на конкретный объект, явление или группу явлений в пределах существенно меньшей территории и подразумевает расчёт некоего параметра, характеризующего устойчивость массива грунтов. Это может быть коэффициент запаса устойчивости пород при склонного массива, предельный размер возможного провала, глубина оттаивания и т.д., для чего применяется некая расчётная модель. Успех прогноза зависит от качества этой модели и достоверности введённых в неё — обычно экспериментальных — параметров. Такой расчёт, в свою очередь, может быть вероятностным или детерминированным. В последнем случае для минимизации числа возможных следствий очевидным или неочевидным образом пренебрегают вариативностью причин, вызывающих опасный процесс. В вероятностном варианте с помощью обычного перебора рассматривается большее количество возможных сочетаний действующих факторов. При этом, к сожалению, нельзя утверждать, что это повышает надёжность расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В. и др.* Бу-реинский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития // *Геориск*. 2019. Т. XII. № 4. С. 46–58.
Zerkal O.V., Makhinov A.N., Kudymov A.V. et al. Bureya landslide 11 December 2018. Conditions of formation and features of the development mechanism // *Georisk*. 2019, vol. XII, no. 4, pp. 46–58.
2. *Фоменко И.К.* Современные тенденции в расчётах устойчивости склонов // *Инженерная геология*. 2012. № 6. С. 44–53.
Fomenko I.K. Modern tendencies in calculations of slope stability // *Engineering Geology*. 2012, no. 6, pp. 44–53.
3. *Аманова Г.С., Вознесенский Е.А.* Инженерно-геологическое моделирование пространственной неоднородности грунтов // *Грунтоведение*. 2023. № 2. С. 13–28.
Amanova G.S., Voznesensky E.A. Engineering-geological modelling of spatial heterogeneity in soils // *Gruntovedenie*. 2023, no. 2, pp. 13–28.
4. *Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Мерзляков В.П. и др.* Геоэкологические риски функционирования ведущих природно-технических комплексов на территории криолитозоны России // *Вопросы географии*. Сб. 142: География полярных регионов / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: Издательский дом “Кодекс”, 2016. С. 57–75.
Sergeev D.O., Perlstein G.Z., Merzlyakov V.P. et al. Geoeological risks of functioning of the leading natural-technical complexes on the territory of the Russian cryolithozone // *Voprosy geografii*. Coll. 142: Geography of polar regions / Ed. by V.M. Kotlyakov. M.: Publishing House “Codex”, 2016, pp. 57–75.
5. *Sergeev D., Chesnokova I., Morozova A.* Estimation of the Past and Future Infrastructure Damage Due the Permafrost Evolution Processes // *AGU Proceedings*. San Francisco, 2015.
6. *Микляев П.С., Сергеев Д.О., Карпенко Ф.С. и др.* Разработка методики инженерно-геокриологического мониторинга состояния автомобильных дорог в криолитозоне // *Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”*, Москва, 28 ноября–2 декабря 2022 г. М.: ООО “Геомаркетинг”, 2022. С. 228–233.
Miklyaev P.S., Sergeev D.O., Karpenko F.S. et al. Development of the methodology of engineering-geocryological monitoring of the state of highways in the cryolithozone // *Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition “Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation”*, Moscow, 28 November–2 December 2022. M.: LLC “Geomarketing”, 2022, pp. 228–233.
7. Методические рекомендации по организации инженерно-геокриологического мониторинга и оборудованию инженерно-геокриологических стационарных мониторинговых постов в полосе отвода автодорог в криолитозоне. ОДМ 218.11.007-2023. Росавтодор, 2023.
Methodological recommendations on organisation of engineering-geocryological monitoring and equipping of engineering-geocryological stationary monitoring posts in the road right-of-way in the cryolithozone. ODM 218.11.007-2023. Rosavtodor, 2023.
8. *Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Хименков А.Н. и др.* Аэровизуальные обследования для оценки опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода (гл. 13) // *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энерго-ресурсов*. М.: МГОФ “Знание”, 2019. С. 295–309.
Sergeev D.O., Perlstein G.Z., Khimenkov A.N. et al. Aerial Visual Surveys for Hazard Assessment of Exogenous Geological Processes on the Trunk Oil Pipeline Route (Chapter 13) // *Security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Safety of means of storage and transport of energy resources*. M.: MGOF “Znanie”, 2019, pp. 295–309.
9. *Osipov V., Aksyutin O., Sergeev D. et al.* Using the Data of Geocryological Monitoring and Geocryological Forecast for Risk Assessment and Adaptation to Climate Change // *Energies*. 2022, vol. 15, no. 3, article number 879.
10. Национальный атлас России. Т. 2. Карстовые пещеры. <https://nationalatlas.ru/>
National atlas of Russia. V.2. Karst caves. <https://nationalatlas.ru/>
11. *Кочев А.Д.* Региональные особенности изучения и оценки опасности карстового и связанных с ним процессов // *Сергеевские чтения. Региональная инженерная геология и геоэкология*. Вып. 25. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (28–29 марта 2024 г.). М.: Геоинфо, 2024. С. 66–70.
Kochev A.D. Regional peculiarities of studying and assessing the danger of karst and related processes / *Sergeev Readings. Regional Engineering Geology and Geoecology*. Iss. 25. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology (28–29 March 2024). M.: Geoinfo, 2024, pp. 66–70.
12. *Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P., Karfidova E.* Predicting radon flux density from soil surface using machine learning and GIS data // *Science of The Total Environment*. 2023, vol. 903, article number 166348.

GEOLOGICAL HAZARDS ON THE TERRITORY OF RUSSIA: THEIR DISTRIBUTION AND DEVELOPMENT PREDICTION

E.A. Voznesensky^{a,b,*}

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**E-mail: eugene@geoenv.ru*

The article deals with the regularities of distribution of manifestations of dangerous geological processes on the territory of Russia and the issues of their reliable forecast. It is demonstrated that local forecast of dangerous processes development is always directed to a specific object, phenomenon or group of phenomena within limited territories and implies the calculation of some parameter characterizing the stability of the soil massif, for which a certain calculation model is necessarily applied. And the success of the forecast depends on the quality of this model and the reliability of the experimental parameters entered into it. In deterministic calculation, the variability of causes causing the process is obviously or unobviously neglected in order to minimize the number of possible consequences. In the probabilistic variant, more possible combinations of acting factors are usually considered by enumeration. Unfortunately, it cannot be claimed that this increases the reliability of calculations, since the key point is the quality of the calculation model used and the consideration of the heterogeneity of the environment.

Keywords: hazardous processes, landslide, karst, geocryological hazards, radon, geological risk, forecast, model.