

УДК 55.550

ПРОБЛЕМА НАРАСТАЮЩЕЙ ОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

© 2022 г. В. В. Фуникова^{1,*}, И. В. Дудлер^{2,**}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Ленинские горы, ГСП 1, г. Москва, 119234 Россия

² Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Уланский переулок, д. 13, стр. 2, а/я 145 Москва, 101000 Россия

*e-mail: funikova@geol.msu.ru

**e-mail: div-33@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 20.11.2021 г.

Принята к публикации 23.11.2021 г.

Глобальная проблема техногенной эпохи Земли была отмечена еще в начале XX в., а с середины прошлого века, по мнению ряда ученых, человечество вступило в новую геологическую эпоху – антропоцен. Цель данной работы – концептуальная постановка проблемы нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды. На основе результатов аналитических исследований и обобщений опубликованных материалов российских и зарубежных авторов дается общая характеристика проблемы техногенных изменений геологической среды. Указываются приоритетно значимые аспекты этих изменений и выявленные авторами закономерности некоторых явлений, в том числе возрастание со временем скорости оседания территорий мегаполисов и крупных городов. Подчеркивается актуальность введения понятий о предельно допустимых нагрузках и воздействиях на геологическую среду и категорий ее техногенных изменений, составления карт уязвимости геологической среды к техногенным воздействиям и карт риска ее техногенных изменений. Приводится перечень путей решения рассматриваемой проблемы, основными из которых являются – осуществление системного подхода к изучению данной проблемы; разработка критериев предельно допустимых воздействий на геологическую среду и выделения категорий ее техногенных изменений; организация исследований на региональном и федеральном уровне; создание Центра Мониторинга геологической среды для координации работ по системному подходу к изучению ее техногенных изменений; подготовка предложений для законодательного закрепления положения о недопущении техногенных нагрузок и воздействий на геологическую среду, превышающих допустимые пределы.

Ключевые слова: геологическая среда, техногенные изменения, характер и масштабы опасности, пути решения проблемы

DOI: 10.31857/S0869780922010052

ВВЕДЕНИЕ

Великий русский ученый В.И. Вернадский предвидел и оценил глобальную проблему техногенной эпохи Земли еще в начале XX в. [1]. Известный ученый в области механики грунтов и инженерной геологии член-корр. Академии наук Армянской ССР Г.И. Тер-Степанян в середине 80-х годов прошлого века отметил переход Земли в новый пятеричный период кайнозойской эры, который уже пришел на смену четвертичного периода в истории Земли [11]. В последнее время некоторые ученые считают, что человечество вступило в новую геологическую эпоху – антропоцен [15, 22, 27].

Эволюционные изменения геологической среды под влиянием природных факторов по своей интенсивности и масштабам значительно меньше вызванных техногенными нагрузками и воздействиями. Это проявляется во всех регионах Земли, в том числе на территории России, причем характерно даже для зон криолитосферы, в пределах которой происходит заметная деградация многолетней мерзлоты под влиянием глобальных изменений климата.

На необходимость приоритетного внимания инженерной геологии в XXI в. к изучению и оценке техногенных изменений геологической среды отмечалось российскими учеными на ряде меж-

дународных конференций, в том числе в Пекине [16], Москве [3].

Цель данной работы – концептуальная постановка проблемы нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Данная работа является развитием идей, изложенных авторами на конференции в МГУ им. М.В. Ломоносова в феврале 2021 г. [3]. В статье предпринята попытка дать общую постановку проблемы, решение которой потребует углубленных исследований и усилий больших коллективов научных организаций.

Техногенные изменения геологической среды носят длительный, интенсивный и непрерывно возрастающий характер, представляя существенную опасность урбанизированным территориям и объектам жизнедеятельности населения. Они носят глобальный характер, негативно проявляются во многих странах и представляют актуальную проблему для нынешнего и грядущего поколений.

К настоящему времени накопились многочисленные данные об изменениях геологической среды [5], прежде всего на территории мегаполисов в разных регионах Земли [7] и странах мира. Для территорий мегаполисов и крупных городов, по-видимому, можно говорить об условной цикличности техногенных изменений режима подземных вод и геологической среды в целом. Длительность циклов зависит от режима застройки–эксплуатации–развития и реконструкции города. Условно это периоды в 25–30 лет, отвечающие этапам технического прогресса и экономического уровня развития городов.

Кроме мегаполисов и крупных городов ареолами наиболее опасных техногенных изменений геологической среды являются территории промышленных и энергетических объектов, рудников и многих других объектов, относящихся к особо опасным и технически сложным. Несмотря на то, что техногенные изменения геологической среды развиваются постепенно, в основном достаточно медленно, но в отдельных случаях могут носить скачкообразный характер (например, при сверхмощных взрывах, авариях на крупных промышленных и энергетических объектах).

Анализ современной изученности рассматриваемой проблемы позволяет выделить следующие **приоритетно значимые техногенные изменения геологической среды:**

- оседания поверхностей урбанизированных территорий, особенно мегаполисов и крупных агломераций;

- подтопление и затопление территорий, расположенных вблизи крупных акваторий в связи с подъемом уровня мирового океана;

- изменения режима разных водоносных горизонтов подземных вод, в том числе с ростом градиента вертикальной фильтрации при снижении пьезометрического уровня напорных вод и поднятием уровня грунтовых вод;

- активизация сейсмической активности, в том числе проявление “наведенной сейсмичности” в районах глубоких водохранилищ, при одновременном снижении уровня динамической устойчивости обводняемых грунтов;

- интенсификация опасных геодинамических процессов (современные движения земной коры, карст, оползни, сели, криогенные процессы на общем фоне деградации многолетней мерзлоты и др.), нередко приводящей к потере несущей способности грунтов основания, деформациям и авариям сооружений;

- изменение напряженно-деформированного состояния грунтов с возможным негативным влиянием на заглубленные и подземные сооружения;

- загрязнения грунтов и подземных вод, вызывающие повышение коррозионной активности грунтов и агрессивности подземных вод, общее ухудшение экологической обстановки;

- возрастание частотности и масштабов чрезвычайных ситуаций (локальных и площадных), вызванных синергетическим эффектом техногенных изменений геологической среды.

Следует отметить, что перечисленные техногенные изменения геологической среды приводят к существенному удорожанию мероприятий инженерной защиты строительных объектов и территорий их размещения для предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций (геологических, технических, экономических, социальных, политических), а также ликвидации их возможных последствий.

Необходимо подчеркнуть перманентный характер комплексных изменений геологической среды, а также определенную стадийность этого процесса с повышением степени опасности этих изменений.

Наибольшие техногенные изменения происходят в верхнем и, частично, в среднем ярусе геологической среды [3]. Динамика этих изменений за последние века показана в табл. 1.

Как видно, с начала XIX в. по настоящее время мощность геологической среды в составе образующих природно-технических систем возросла более чем в 10 раз – до 250–300 м. При этом наибольшая степень техногенных изменений наблюдается в ее верхнем ярусе в пределах глубин до 50–75 м. Не случайно при изысканиях для размещения и проектирования АЭС геологические ис-

Таблица 1. Характеристика зон геологической среды по глубине и динамика изменения их границ

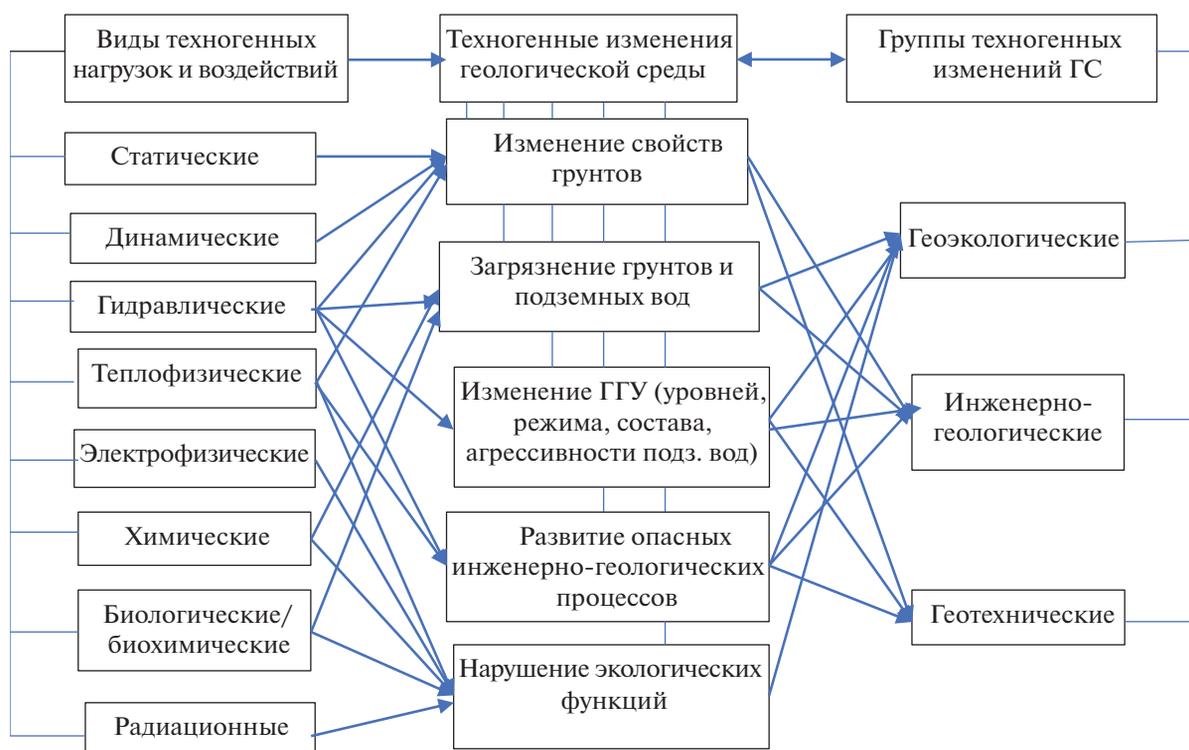
Зоны геологической среды	Степень техногенных изменений	Техногенные факторы	Глубина нижней границы зоны, м		
			XIX в.	XX в.	XXI в., прогноз
Верхняя	Высокая	Планировка рельефа местности, техногенные грунты, подземные коммуникации, фундаменты и конструкции сооружений, подтопление территорий, техногенный режим грунтовых вод, широкий спектр техногенных нагрузок и воздействий	5	25	50–75
Средняя	Средняя	Фундаменты свайные и глубокого заложения, комплексы подземных сооружений, водопонижение, изменение НДС массива грунтов, природно-техногенный режим подземных вод	15	50	100–150
Нижняя	Низкая	Локальные подземные сооружения, глубинные водозаборы, отдельные виды техногенных воздействий	25	100	Более 250–300

следования проводятся на глубину 300–400 м, инженерно-геологические скважины проходят на глубину до 120–130 м, а статическое зондирование дисперсных грунтов осуществляется нередко до глубины 50–80 м.

Техногенные изменения геологической среды носят комплексный характер и имеют важное

геоэкологическое, инженерно-геологическое и геотехническое значение (рис. 1).

Заслуживают особого внимания и углубленного анализа данные об оседании территории различных регионов [9], из которых следует, что в результате хозяйственной деятельности человека происходят техногенные оседания земной по-

**Рис. 1.** Геоэкологические, инженерно-геологические и геотехнические изменения геологической среды.

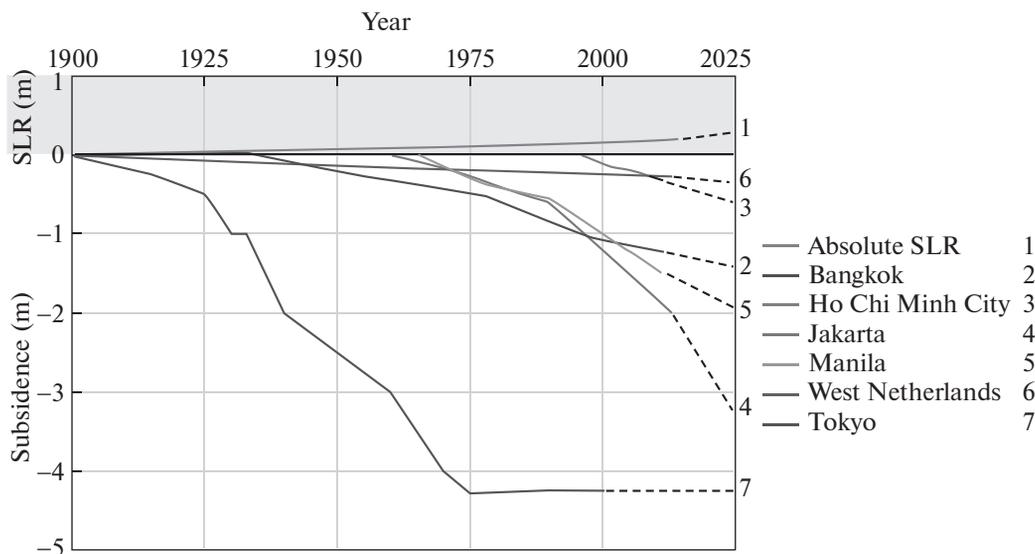


Рис. 2. Оседание (subsidence) территории прибрежных городов мира [19].

верхности особенно в местах расположения крупных мегаполисов, когда величины осадок измеряются метрами за период наблюдений, а скорости оседания – десятками сантиметров в год. Самые большие оседания земной поверхности (депресссионные воронки) отмечаются в США: в штате Калифорнии – 16000 км², Техасе – 12000 км², Аризоне – 2700 км² [13]. Интернациональная группа ученых (Испания, Бразилия, Нидерланды и др.), проанализировавшая ситуацию в 34 странах мира, отметила высокие темпы оседания поверхности застроенных территорий, при сохранении которых 12 млн км², где проживает 19% населения Земли, к 2040 г. окажутся ниже уровня мирового океана [21].

Локальные осадки территории г. Сан-Франциско в штате Калифорния составляют 80 мм, но с учетом прогнозируемого к 2050 г. подъема уровня одноименного залива Тихого океана на 200–300 мм, рассматриваются как опасное явление [23].

На рис. 2 отражена тенденция оседания некоторых прибрежных городов мира в XX – начале XXI вв. [19]. Максимальные значения оседания территории отмечены в г. Токио (4.25 м), однако оседание стабилизировалось в 1975 г., тогда как Джакарта, “просевшая” на 2 м, продолжает стремительно оседать со скоростью (по данным [14]) до 28 см/год. Прогнозируется дальнейший рост оседания территории мегаполисов в XXI в. На рис. 2 абсолютное повышение моря (absolute SLR) показано в качестве ориентира. Оседание может значительно различаться в пределах города в зависимости от уровня грунтовых вод и характеристик недр. Указанные значения можно рассматривать как среднее значение для локальных очагов проседания. В некоторых городах в насто-

ящее время наблюдается ускорение оседания грунта в результате экономического роста. Токио выделяется как пример, где оседание прекратилось после того, как были приняты успешные меры по смягчению последствий.

Проведенный авторами более детальный анализ данных по 20 городам 11 стран Европы, Азии и Северной Америки показал следующее:

– на протяжении 100-летнего периода наблюдений скорости оседания поверхности территорий городов в разных регионах изменялись в весьма широких пределах – от первых единиц и даже долей мм/год до 100–300 мм/год. Это свидетельствует о многофакторности данного процесса, прежде всего влияния различных геологических условий и режима техногенных воздействий;

– в опубликованных материалах зафиксированы, как правило, осредненные данные за длительные периоды, измеряемые часто многими десятилетиями (иногда указан только век XX или XXI), что затрудняет установление динамики рассматриваемого процесса. Вместе с тем, в тех случаях, когда для отдельных городов имеются данные хотя бы двух разных периодов наблюдений, выявляется явный тренд возрастания скорости оседания городов со временем. Так, например, средняя скорость оседания г. Дакка составляла в 1992–1999 гг. 10.1 мм/год, а в 2014–2017 гг. 16.6 мм/год [20]; максимальная скорость оседания в г. Джакарта в 1982–1991 гг. составляла 50 мм/год, в 1991–2006 гг. 250 мм/год и в 2007–2008 гг. 280 мм/год [14]. Судя по этим данным, можно ожидать, что в 2025–2030 гг. максимальная скорость оседания территории Джакарты до-

стигнет 300–400 мм/год, если не будут предприняты необходимые превентивные мероприятия.

В этой связи есть основания полагать, что данные ранее проведенных наблюдений, особенно при их регулярности и систематизированном рассмотрении, могут и должны использоваться в качестве фондовых материалов для реализации *ретромониторинга* техногенных изменений геологической среды (в данном случае проявляющихся в оседаниях освоенных территорий), что позволит составлять более обоснованные прогнозы на отдаленные периоды времени и программы текущего мониторинга природно-технических систем.

Эти данные полностью подтверждают выдвинутое нами положение об актуальности установления предельно допустимых нагрузок и воздействий на геологическую среду, а также введении понятия о категориях техногенных изменений геологической среды [3].

В этой связи уместно отметить, что, по мнению авторов, предельно-допустимыми следует считать те техногенные нагрузки и воздействия, превышение параметров которых приводит к необратимым и чрезвычайно опасным изменениям геологической среды, способным вывести техногенные объекты из режима штатного функционирования и привести к недопустимому риску для жизнедеятельности населения.

Оседание застроенных территорий в большинстве опубликованных работ связывается с огромными откачками воды из различных водоносных горизонтов [19, 24–26, 28 и др.]. Вместе с тем необходимо учитывать бурный рост массы техносферы, которая каждые 20 лет становится вдвое тяжелее и сейчас достигла веса в 11 трлн т и уже превышает всю биомассу Земли [18]. Это не только нагрузка на геологическую среду от высоких бетонных и земляных сооружений – плотин, золоотвалов, хвостохранилищ, высотных зданий, но и от других объектов инфраструктуры освоенных территорий. В городах свой “вклад” вносит и многовековой рост “культурного слоя”. Так, например, по данным Н.Н. Федотовой [12], регулярное увеличение мощности техногенных отложений в Москве составляет в среднем на 1.5 м за столетие. Не трудно подсчитать, что за 850 лет в Москве их накопилось около 13 м, а местами до 20 м, к тысячелетию будет уже в среднем 15 м, и только это дополнительное давление на геологическую среду города составит 0.3 МПа. Для сравнения – давление на грунты оснований от реакторного блока современных АЭС достигает 0.8–1.0 МПа.

Следует учитывать, что оседания территории ведут к дополнительным осадкам зданий и сооружений, они могут превышать допустимые значения осадков и кренов, в том числе объектов

атомной энергетики. Заметим, что для здания реакторного отделения современных АЭС максимально допускаемая осадка составляет 30 см при условии, что 2/3 ее происходит в период до пуска станции, а допустимый крен не должен превышать 1:1000. Оседания территорий могут также вызывать дополнительные напряжения в конструкциях, приводить к разрыву подземных коммуникаций (в том числе водонесущих – отсюда утечки) и провоцировать инженерно-геологические процессы: суффозионные выносы, эрозионные размывы и другие. При этом необходимо исходить из приоритетности учета техногенных изменений геологической среды в снижении риска на всех стадиях жизненного цикла строительных объектов, особенно на территориях мегаполисов и размещения особо опасных и технически сложных объектов [17].

В свете рассматриваемой проблемы представляется актуальным поставить вопрос о необходимости разработки методики составления карт риска техногенных изменений геологической среды.

И.В. Дудлером и В.В. Фуниковой был сформулирован [3] закон инженерной геологии о техногенном изменении геологической среды: “*Устойчивость (чувствительность) геологической среды к техногенным воздействиям адекватна особенностям ее исходного геологического строения в месте (зоне) их приложения и параметрам этих воздействий*”.

Следовательно, для построения карт риска техногенных изменений геологической среды, необходимо располагать картами распространения геологических опасностей на рассматриваемой территории (карты геологической “уязвимости” геологической среды), а также картами концентрации техногенных нагрузок и воздействий на эту территорию.

Напомним, что, как справедливо отмечал А.Л. Рагозин, риск возникает на пересечении геологической опасности с объектом, которому угрожает эта опасность [9]. В данном случае это пересечение уязвимости геологической среды с объектами техногенных нагрузок и воздействий (рис. 3).

Очевидно, что необходимо иметь карты уязвимости геологической среды к техногенным воздействиям и карты концентрации техногенных нагрузок и воздействий на геологическую среду в пределах рассматриваемой застроенной/застраиваемой территории и зоны ее влияния (рис. 4).

Системный анализ позволил в свое время ответственным ученым составить комплект карт геологических опасностей на территории бывшего СССР и современной России [2], карты изменения геологической среды как основы региональных инженерно-геологических прогнозов [10],

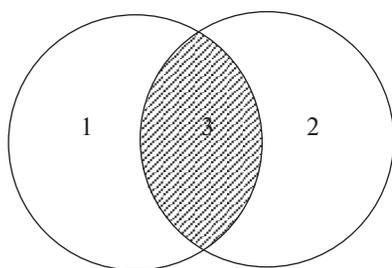


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая взаимосвязь уязвимости геологической среды к техногенным воздействиям (1) с концентрацией техногенных нагрузок и воздействий (2) и риском техногенных изменений геологической среды (3).

карты распространения неблагоприятных геологических процессов на территории Москвы [4] в соответствии с принципами инженерно-геологического районирования г. Москвы [6].

На базе этого материала и составления карт концентрации техногенных нагрузок и воздействий на геологическую среду (мегаполисы, крупные энергетические и промышленные объекты, зоны разработки полезных ископаемых и так далее) возможно методом интерференции указанных карт построить прогнозные карты уязвимости геологической среды к техногенным воздействиям и риска техногенных изменений геологической среды территорий России с выделением разных категорий такой опасности и специфики приоритетно значимых факторов для разных регионов страны.

Основными *принципами* построения прогнозной карты риска техногенных изменений геологической среды, по мнению авторов, должны быть следующие:

- системный подход (учет всех факторов уязвимости геологической среды и всех видов техногенных нагрузок и воздействий);

- дифференцированный и интегральный подходы (с целью учета как отдельных геологических факторов и видов техногенных воздействий, так и их комплексный учет, в том числе с учетом проявления синергетического эффекта);

- интерференция (наложение) рассматриваемых факторов и воздействий;

- приоритетность (последовательность рассмотрения и учета наиболее значимых факторов и воздействий);

- разномасштабное картирование (мелкомасштабное для крупных регионов и территории страны в целом; среднемасштабное для мегаполисов, крупных промышленных, энергетических и гидротехнических объектов, а также магистральных объектов; крупномасштабное для инженерно-геологических областей и районов, а также для отдельных строительных объектов);

- региональный подход (обеспечивая приоритет региональному картированию для учета региональных инженерно-геологических условий, характера местных техногенных воздействий, а также учета социальных и экономических условий региона, при этом следует учитывать, что техногенные изменения геологической среды могут распространяться и за пределы конкретного региона);

- оптимизация (в частности, широкое использование многолетних фондовых изыскательских материалов и мониторинга развития опасных деформаций строительных объектов, в том числе памятников истории и культуры);

- научно-техническое сопровождение (обязательность априори необходимых НИР и экспертно-консультативного участия соответствующих научных организаций);

- технико-экономическая и социально-экологическая эффективность (при составлении программ выполнения рассматриваемых работ и оценке риска).

Составление указанной карты позволит обосновать расположение и специфику сети соответствующего мониторинга геологической среды, будет способствовать предупреждению развития чрезвычайных ситуаций с проявлением геологических, экологических, экономических и социальных рисков, а также своевременному выделению средств для принятия необходимого комплекса законодательных решений и мероприятий

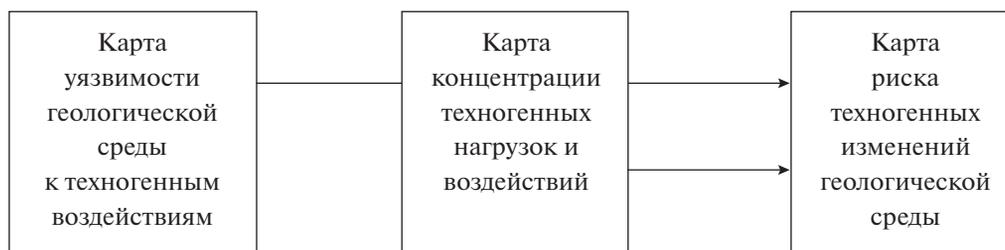


Рис. 4. Схематическое изображение информации для карт риска техногенных изменений геологической среды.

инженерной защиты застроенных и осваиваемых территорий.

Следует подчеркнуть, что все геологические карты, используемые в инженерно-геологических целях, особенно крупномасштабные, должны сопровождаться указанием не только даты их составления, но и допустимых сроков использования без корректировки для учета техногенных изменений геологической среды со временем. Прежде всего это касается тех карт, которые отражают наиболее динамичные факторы инженерно-геологических условий строительства: гидрогеологические карты, карты опасности инженерно-геологических процессов и физико-механических свойств грунтов в выделяемых инженерно-геологических элементах.

Территория мегаполисов активно расширяется. Если в 2010 г. площадь Москвы составляла 1077 км², то в 2021 г. уже 2562 км². Одним из возможных решений проблемы оттока населения в города-миллионники видится в альтернативном пути развития российских городов [9] путем создания большого числа межгородских агломераций (по три города с суммарным населением не более 3 млн человек и расстоянием между городами не более 150 км, например, Липецк–Воронеж–Тамбов, Калуга–Тула–Рязань, Уфа–Магнитогорск–Стерлитамак и др.). Представляется необходимым уже сейчас предусмотреть организацию соответствующего мониторинга, так как техногенные нагрузки и воздействия на геологическую среду в пределах таких территорий, несомненно, возрастут и могут привести к ее негативным изменениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение перечислим приоритетные пути решения рассмотренной проблемы. По мнению авторов, такими являются:

– осуществление *системного подхода* к изучению данной проблемы на основе разработки современной концепции и принципов проведения исследований для решения теоретических и прикладных задач;

– разработка критериев для установления *предельно допустимых воздействий* на геологическую среду и выделения *категорий ее техногенных изменений*;

– организация исследований на региональном и федеральном уровне, для чего крайне желательно принятие *Комплексной Целевой Программы Правительства РФ* по проблеме ограничения техногенных изменений геологической среды;

– создание *Центра Мониторинга геологической среды* для координации работ по системному подходу к изучению техногенных изменений геоло-

гической среды, ее рациональному использованию и охране;

– подготовка предложений для законодательного закрепления положения о недопущении техногенных нагрузок и воздействий на геологическую среду, превышающих допустимые пределы в связи с риском развития опасных и необратимых процессов, с последующим приведением строительных норм в соответствие с этими положениями;

– введение в вузах страны специальных учебных программ по рассматриваемой проблеме для магистратуры и специалитета, в том числе с основами BIM-технологий (building information modeling) – технологий информационного моделирования промышленных и гражданских объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вернадский В.И.* Несколько слов о ноосфере // Успехи современной биологии. 1944. Т. 18. Вып. 2. С. 113–120. URL: http://glonoos.com/wp-content/uploads/Vernadsky_article.pdf.
2. *Дзекцер Е.С., Пырченко В.А.* Технология обеспечения устойчивого развития урбанизированных территорий в условиях воздействия природных опасностей. М.: ЗАО “ДАР/ВОДГЕО”, 2004. 166 с.
3. *Дудлер И.В., Фуникова В.В.* Геологическая среда в современную эпоху: приоритеты изучения и оценки с позиций инженерной и экологической геологии // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: тр. Междунар. научн. конф. / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. М.: ООО “Сам Полиграфист”, 2021. С. 108–113.
4. Москва. Геология и город / Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева. М.: Московские учебники и Картолитография, 1997. 400 с.
5. *Осипов В.И.* Техногенез и современные задачи наук о Земле // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 3. С. 4–12.
6. *Осипов В.И., Антипов А.В.* Принципы инженерно-геологического районирования территории Москвы // Геоэкология. 2009. № 1. С. 3–13.
7. *Осипов В.И., Еремينا О.Н., Козлякова И.В.* Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (обзор зарубежного опыта) // Геоэкология. 2017. № 3. С. 3–15.
8. *Поляков А.С., Вархатов Т.А.* Terra Urbana. Города, которые мы п...м. М.: Эксмо, 2021. 570 с.
9. *Рагозин А.Л.* Теория и практика оценки геологических рисков: автореф. дис. ... докт. геол.-мин.: 04.00.07. М.: ПНИИИС, 1997. 60 с.
10. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Терешков Г.В.* Карты изменения геологической среды как основа региональных инженерно-геологических прогнозов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 1978. № 5. С. 3–13.
11. *Тер-Степанян Г.И.* Начало пятеричного периода или техногена: Инж.-геол. анализ. Ереван: АН АрмССР, 1985. 100 с.

12. Федотова Н.Н. Воздействие эволюционных изменений геологической среды исторических территорий на сохранность памятников архитектуры (на примере Москвы) // Сб. "Денисовские чтения I", 12 октября 2000 г. М.: МГСУ, 2000. С. 158–162.
13. Фи Хонг Тхинь, Строчкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности при водопонижении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 4. С. 6–17.
14. Abidin H.Z., Andreas H., Gumilar I., Fukuda Y., Pohan Y.E., Deguchi T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development // Natural Hazards. 2011. V. 59 (3). P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>
15. Braje T.J. Earth Systems, Human Agency, and the Anthropocene: Planet Earth in the Human Age // J. of Archaeological Research. 2015. V. 23 (4). P. 369–396. <https://doi.org/10.1007/s10814-015-9087-y>
16. Doudler I.V., Vorontsov E.A., Liarski S.P. Engineering geology priorities in XXI century / Global View of Engineering Geology and the Environment. Proc. of the Int. Symp. and 9th Asian Reg. Conf. of IAEG. China, 23–25 Sept. 2013. London: CRC press/Taylor and Francis, 2013. P. 575–580.
17. Dudler I.V., Khayme N.M., Lyarskii S.P. Methodology of Site Investigation for Extremely Hazardous, Technologically Complicated, and Unique Engineering // Water Resources. 2015. V. 41 (7). P. 904–915. <https://doi.org/10.1134/S0097807814070045>
18. Elhacham E., Ben-Uri L., Grozovski J., Bar-On Y.M., Milo R. Global human-made mass exceeds all living biomass // Nature. 2020. V. 588. P. 442–444. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>
19. Erkens G., Bucx T., Dam R., de Lange G., Lambe J. Sinking coastal cities // Proc. of the Int. Association of Hydrological Sciences. 2015. V. 372. P. 189–198. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-189-2015>
20. Haque D.M.E., Hayat T., Tasnim S. Time Series Analysis of Subsidence In Dhaka City, Bangladesh Using InSAR // Malaysian Journal of Geosciences. 2019. Vol. 3 (1). P. 32–44. <https://doi.org/10.26480/mjg.01.2019.32-44>
21. Herrera-Garcna G., Ezquerro P., Tomas R., Bejar-Pizarro M., Lopez-Vinielles J., Rossi M., et al. Mapping the global threat of land subsidence // Science. AAAS. 2021. V. 371. Is. 6524. P. 34–36. <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>
22. Lewis S. L., Maslin M. A. Geological evidence for the Anthropocene // Science. 2015. V. 349. Is. 6245. P. 246–247. <https://doi.org/10.1126/science.349.6245.246-b>
23. Parsons T. The Weight of Cities: Urbanization Effects on Earth's Subsurface // AGU Advances. 2021. V. 2. e2020AV000277. <https://doi.org/10.1029/2020AV000277>
24. Pirouzi A., Eslami A. Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis // Int. Journal of Geo-Engineering. 2017. V. 8 (1). P. 1–21.
25. Waltham T. Sinking cities – Feature // Geology Today. 2002. V. 18 (3). P. 95–100. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341.x>
26. Xu Y., Shen S.-L., Cai Z.-Y., Zhou G.-Y. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China // Natural Hazards. 2008. V. 1. 45 (1). P. 123–135. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9168-4>
27. Zalasiewicz J., Williams M., Waters C.N., Barnosky A.D., Palmesino J., et al. Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective // The Anthropocene Review. 2017. V. 4. Is. 1. P. 9–22. <https://doi.org/10.1177/2053019616677743>
28. Zhu L., Gong H., Li X., Wang R., Chen B., Dai Z., Teatini P. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China // Engineering Geology. 2015. V. 193. P. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.020>

THE GROWING HAZARD OF HUMAN-INDUCED CHANGES IN GEOENVIRONMENT AND WAYS TO SOLVE IT

V. V. Funikova^{a,#} and I. V. Dudler^{b,##}

^a Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119234 Russia

^b Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology,
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

[#]e-mail: funikova@geol.msu.ru

^{##}e-mail: div-33@yandex.ru

The global problem of the technogenic era on the Earth was noted at the beginning of the twentieth century, and from the middle of the last century, according to a number of scientists, humankind entered a new geological era – the Anthropocene. The purpose of this work is a conceptual formulation of the problem of the growing danger of technogenic changes in the geological environment. Based on the results of analytical studies and generalizations of published materials by Russian and foreign authors, a general description of the problem of technogenic changes in the geological environment is given. The priority important aspects of these changes are indicated as well as the patterns of some phenomena identified by the authors, including an increase in the rate of surface subsidence in megacities and large cities with time. The relevance of introducing

the concepts of maximum permissible loads and impacts on the geological environment and categories of its technogenic changes, compiling maps of the vulnerability of the geological environment to technogenic impacts and maps of the risk of its technogenic changes is emphasized. The ways to solve the problem under consideration are listed, the main of which are the implementation of a systematic approach to the study of this problem; development of criteria for maximum permissible impacts on the geological environment and the selection of categories of its technogenic changes; arrangement of research at the regional and federal levels; creation of the Center for Monitoring the Geological Environment to coordinate work on a systematic approach to the study of its technogenic changes; preparation of proposals for the legislative consolidation of the provision on the prevention of man-made loads and impacts on the geological environment that exceed permissible limits.

Keywords: *geological environment, human-induced changes, nature and scale of hazard, solutions to the problem*

REFERENCES

- Vernadskii, V.I. *Neskol'ko slov o noosfere* [A few words about the noosphere]. *Uspekhi sovremennoi biologii*. 1944, vol. 18, no. 2, pp. 113–120. URL: http://glo-noos.com/wp-content/uploads/Vernadsky_article.pdf. (in Russian)
- Dzektser, E.S., Pyrchenko, V.A. *Tekhnologiya obe-specheniya ustoichivogo razvitiya urbanizirovannykh territorii v usloviyakh vozdeistviya prirodnykh opasnostei* [Technology for ensuring sustainable development of urbanized territories under the influence of natural hazards]. Moscow, ZAO DAR/VODGEO Publ., 2004. 166 p. (in Russian)
- Dudler, I.V., Funikova, V.V. *Geologicheskaya sreda v sovremennuyu epokhu: priority izucheniya i otsenki s pozitsii inzhenernoi i ekologicheskoi geologii* [Geological environment in the modern era: priorities of study and evaluation from the standpoint of engineering and environmental geology]. Proc. Int. Sci. Conf. "New ideas and theoretical aspects of engineering geology". V.T. Trofimov, V.A. Korolev, Eds., Moscow, Sam Poligrafist Publ., 2021, pp. 108–113. (in Russian)
- Moskva. Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds., Moscow, Moskovskie uchebniki i Kartolitografiya Publ., 1997, 400 p. (in Russian)
- Osipov, V.I. *Tekhnogenez i sovremennye zadachi nauk o Zemle* [Technogenesis and modern problems in the Earth sciences]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 4–12. (in Russian)
- Osipov, V.I., Antipov, A.V. *Printsipy inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya territorii Moskvy* [Principles of engineering-geological zoning of the territory of Moscow]. *Geoekologiya*, 2009, no. 1, pp. 3–13. (in Russian)
- Osipov, V.I., Eremina, O.N., Kozlyakova, I.V. *Otsenka ekzogennykh opasnostei i geologicheskogo riska na urbanizirovannykh territoriyakh (obzor zarubezhnogo opyta)* [Assessment of exogenous hazards and geological risk in urbanized areas (review of foreign experience)]. *Geoekologiya*, 2017, no. 3, pp. 3–15. (in Russian)
- Polyakov, A.S. Varkhotov, T.A. *Terra Urbana. Goroda, kotorye my p...m* [Terra Urbana. Cities that we p...m]. Moscow, EKSMO Publ., 2021, 570 p. (in Russian)
- Ragozin, A.L. *Teoriya i praktika otsenki geologicheskikh riskov: avtoreferat dis. ... dokt. geol.-min .nauk* [Theory and practice of geological risk assessment]. Extended abstract Doct. (Geol.-Min. Sci.) dissertation. Moscow, PNIIS, 1997, 60 p. (in Russian)
- Sergeev, E.M., Golodkovskaya, G.A., Tereshkov, G. *Karty izmeneniya geologicheskoi sredy kak osnova regional'nykh inzhenerno-geologicheskikh prognozov* [Maps of changes in the geoenvironment as the basis for regional engineering geological forecasts]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*, 1978, no. 5, pp. 3–13. (in Russian)
- Ter-Stepanyan, G.I. *Nachalo pyaterichnogo perioda ili tekhnogena: inzhenerno-geologicheskii analiz* [The beginning of the quintuple period or technogen: engineering geological analysis]. Erevan, AN ArmSSR Publ., 1985, 100 p. (in Russian)
- Fedotova, N.N. *Vozdeistvie evolyutsionnykh izmenenii geologicheskoi sredy istoricheskikh territorii nasohran-nost' pamyatnikov arhitektury (na primere Moskvy)* [The impact of evolutionary changes in the geological environment of historical territories on the preservation of architectural monuments (by the example of Moscow)]. *Denisovskie chteniya I*, Moscow, MGSU Publ., 2000, pp.158–162. (in Russian)
- Fi, Hong Thin', Strokova, L.A. *Tipizatsiya gruntovykh tolshch territorii goroda Hanoi (V'etnam) pri izuchenii osedaniya zemnoi poverkhnosti pri vodoponizhenii* [Typification of the soil strata of the territory of Hanoi (Vietnam) in the study of subsidence of the Earth's surface during water reduction]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 6–17. (in Russian)
- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E., Deguchi, T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, 2011, vol. 59 (3), pp. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>.
- Braje, T.J. Earth Systems, human agency, and the Anthropocene: planet Earth in the Human age. *Journal of Archaeological Research*, 2015, vol. 23 (4), pp. 369–396. <https://doi.org/10.1007/s10814-015-9087-y>.
- Doudler, I.V., Vorontsov, E.A., Liarski, S.P. Engineering geology priorities in XXI century. *Global View of Engineering Geology and the Environment. Proc. of the Int. Symp. and 9th Asian Reg. Conf. of IAEG*. 2013, pp. 575–580.
- Dudler, I.V., Khayme, N.M., Lyarskii, S.P. Methodology of Site Investigation for Extremely Hazardous, Technologically Complicated, and Unique Engineering. *Water Resources*, 2015, vol. 41(7), pp. 904–915. <https://doi.org/10.1134/S0097807814070045>.
- Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y.M., Milo, R. Global human-made mass exceeds all living

- biomass. *Nature*, 2020, vol. 588, pp. 442–444. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.
19. Erkens, G., Bucx, T., Dam, R., de Lange, G., Lambe, J. Sinking coastal cities. *Proc. of the Int. Association of Hydrological Sciences*, 2015, vol. 372, pp. 189–198. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-189-2015>.
20. Haque D.M.E., Hayat T., Tasnim S. Time Series Analysis of Subsidence In Dhaka City, Bangladesh Using InSAR. *Malaysian Journal of Geosciences*. 2019, vol. 3 (1), pp. 32–44. <https://doi.org/10.26480/mjg.01.2019.32.44>.
21. Herrera-Garcna, G., Ezquerro, P., Tomas, R., Bejar-Pizarro, M., Lopez-Vinielles, J., Rossi, M., et al. Mapping the global threat of land subsidence. *Science AAAS*, 2021, vol. 371, is. 6524, pp. 34–36. <https://doi.org/10.1126 / science.abb8549>.
22. Lewis, S.L., Maslin, M.A. Geological evidence for the Anthropocene. *Science*, 2015, vol. 349, is. 6245, pp. 246–247. <https://doi.org/10.1126/science.349.6245.246-b>.
23. Parsons, T. The Weight of cities: urbanization effects on Earth's subsurface. *AGU Advances*, 2021, vol. 2, e2020AV000277. <https://doi.org/10.1029/2020AV000277>.
24. Pirouzi, A., Eslami, A. Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. *Int. Journal of Geo-Engineering*, 2017, vol. 8 (1), pp. 1–21.
25. Waltham, T. Sinking cities – Feature. *Geology Today*, 2002, vol. 18 (3), pp. 95–100. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2451.2002.00341.x>
26. Xu, Y., Shen, S.-L., Cai, Z.-Y., Zhou, G.-Y. The state of land subsidence and prediction approaches due to groundwater withdrawal in China. *Natural Hazards*, 2008, vol. 45(1), pp. 123–135.
27. Zalasiewicz, J., Williams, M., Waters, C.N., Barnosky, A.D., Palmesino, J., et al. Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective. *Anthropocene Review*, 2017, vol. 4, is. 1, pp. 9–22. <https://doi.org/10.1177/2053019616677743>.
28. Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., Teatini, P. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 2015, vol. 193, pp. 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.020>