

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 55.550

ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ (ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ, ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)

© 2022 г. В. В. Фуникова^{1,*}, И. В. Дудлер^{2,**}, Р. Т. Бутаев^{3,***}

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

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

³ ООО “Альтеркаса”, 1-й Тружников пер., 17А, Москва, 119121 Россия

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

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

***E-mail: butaev.r.t@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 11.12.2021 г.

Принята к публикации 20.12.2021 г.

Отмечается перманентный характер техногенного изменения на застроенных территориях режима подземных вод, являющихся наиболее динамичной компонентой геологической среды. Обращается внимание на комплексные изменения режима подземных вод, которые могут иметь целый ряд негативных последствий геоэкологического, инженерно-геологического и гидрогеологического плана, определяющих, в том числе и сложность инженерно-геологических условий строительства. Предполагается определенная цикличность техногенных изменений режима подземных вод и геологической среды в целом, отвечающим этапам технического прогресса и экономического уровня развития городов. Кратко освещаются типичные для XX и начала XXI веков оседания поверхности территорий мегаполисов в связи с мощными и длительными водозаборами для питьевого и технического водоснабжения. Подчеркнуто значение долгосрочных прогнозов техногенного изменения режима подземных вод, в частности длительных прогнозов подтопления на примере Москвы. Показано особое значение контролирования и учета изменения градиента вертикальной фильтрации для застроенных территорий с потенциальной опасностью развития карстово-суффозионных процессов. В заключении отмечается необходимость системного подхода к изучению и учету техногенных изменений режима подземных вод, в том числе: организации гидрогеологического мониторинга; включения карты градиента вертикальной фильтрации в состав комплекта гидрогеологических карт; составления гидрогеологических моделей территории города и его административных округов, а также особо опасных и технически сложных объектов (на основе математического, аналогового и физического моделирования); ведения долгосрочного прогнозирования.

Ключевые слова: подземные воды, техногенные изменения режима подземных вод, геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические аспекты

DOI: 10.31857/S0869780922020035

ВВЕДЕНИЕ

В спектре перманентно возрастающих техногенных изменений геологической среды особое значение имеют техногенные изменения подземных вод, являющихся ее самой динамичной компонентой. Именно подземные воды наиболее быстро и резко реагируют на многие виды техногенных воздействий.

На актуальность этих вопросов было обращено внимание еще в начале 80-х годов прошлого

века. В декабре 1983 г. секцией литосферы Научного совета АН СССР по проблемам биосферы совместно с секцией гидрогеологии и инженерной геологии Центрального правления Научно-технического геологического общества (НТГО) Центральных районов РФ был проведен семинар “Современные инженерно-геологические и гидрогеологические методы комплексной оценки и прогноза изменений геологической среды под влиянием инженерно-хозяйственной деятельно-

сти человека". В опубликованных материалах этого семинара [13] обсуждались методологические вопросы, задачи и методы комплексной оценки и прогноза изменений геологической среды, особенности этих изменений применительно к разным видам антропогенных воздействий, в том числе при разных видах строительства, а также вопросы определения экономического ущерба, вызываемого техногенными воздействиями на геологическую среду. Однако в то время все эти вопросы еще не рассматривались на уровне важнейшей проблемы, не поднимался вопрос о нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды и приоритетности их изучения инженерной геологией и инженерной гидрогеологией, не ставился остро вопрос о предельно допустимых техногенных воздействиях на геологическую среду. Это стало очевидным лишь в начале XXI века [11, 21]. Тем не менее, материалы статей, опубликованных в [13], не потеряли своей актуальности. Особо выделим статью Г.А. Голодковской и Л.М. Демидюк [4], в которой обсуждалась необходимость создания моделей геологической среды в составе природно-технических систем, выделения типов изменения геологической среды и оценки степени ее изменения, определения уровня допустимой техногенной нагрузки на разные типы геологической среды, разработки критериев для оценки инженерно-геологической устойчивости территории и сравнения различных инженерно-геологических обстановок. Высказанные в данной работе положения в полной мере справедливы и применительно к комплексным исследованиям техногенного изменения режима подземных вод на освоенных территориях.

Рассматривая проблему трансформации гидрогеологических условий в современную эпоху, в широком смысле правомерно говорить о техногенном изменении режима подземных вод (т.е. изменении со временем их качественных и количественных характеристик), существенно влияющем на все компоненты геологической среды и развивающиеся в ее границах геодинамические процессы, в том числе инженерно-геологические.

Следует подчеркнуть существенную роль каждого из параметров подземных вод: химический и минеральный составы, температура, уровни проявления и установления, величины напора, градиенты горизонтальной и вертикальной фильтрации, скорость движения и расходы, бальнеологические и другие характеристики.

В общем случае необходимо учитывать геоэкологические, инженерно-геологические и гидрогеологические последствия техногенного изменения режима подземных вод. Среди наиболее значимых отметим ряд из них.

Геоэкологические:

- оседание поверхности территорий мегаполисов, расположенных вблизи морских аквато-

рий, в связи с повышением уровня мирового океана, и опасностью их затопления;

- загрязнение подземных вод (химическое, тепловое, радиационное, биологическое), в том числе артезианских;

- загрязнение почв и грунтов при инфильтрации бытовых и промышленных стоков;

- попадание загрязненных подземных вод в поверхностные воды;

- негативное влияние на биосферу в границах влияния геологической среды.

Инженерно-геологические:

- оседание застроенных территорий под влиянием мощных водозаборов (что может приводить к развитию дополнительных осадков и кренов зданий и сооружений, превышающих допустимые значения);

- локальные повышения сейсмичности территории (в том числе "наведенная сейсмичность" в зоне крупных водохранилищ с высотными плотинами);

- проявление потенциально возможных опасных геологических процессов (например, карсто-суффозионных);

- повышение интенсивности и масштаба распространения ряда инженерно-геологических процессов;

- изменение физико-механических свойств грунтов;

- изменение напряженно-деформированного состояния массива грунтов, повышение его влияния на конструкции подземных сооружений.

Гидрогеологические:

- нарушение естественного режима подземных вод и регионального баланса гидросферы в границах и зоне влияния застроенных территорий;

- проявление локальных сочетанных процессов затопления и подтопления застроенных территорий в зоне влияния крупных естественных и техногенных акваторий, а также в зонах регулярных наводнений.

Следует учитывать, что отмеченные процессы приводят к изменению характеристик ряда факторов, определяющих сложность инженерно-геологических условий строительства. Некоторые из параметров режима подземных вод часто не учитываются в должной мере. Это относится, в частности к температуре подземных вод. Между тем, по данным Б.Л. Горловского и Л.М. Шехтмана, на площадках эксплуатируемых тепловых и атомных электростанций в грунтовых водах температура повышается в среднем на 20°C (локально до 60°C), а межпластовых на 10°C [6]. Не случайно Харьковское отделение АЭП проводило (после известных проблем на Ровенской АЭС) специальные исследования для оценки влияния повы-

шения температуры подземных вод на возможность интенсификации карстовых процессов. Следует заметить, что и на территории городов температура подземных вод повышается (например, в Москве были зафиксированы локальные повышения температуры грунтовых вод до 30°C).

Техногенные изменения геологической среды, в том числе подземных вод, 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, при особо интенсивном ведении строительных работ/реконструкции в условиях плотной городской застройки территорий). С инженерно-геологических позиций необходимо устанавливать предельно допустимые техногенные изменения геологической среды и категории опасности этих изменений [11]. В полной мере это относится и к техногенным изменениям режима подземных вод.

Остановимся несколько подробнее на некоторых опасных последствиях техногенных изменений режима подземных вод.

ВЛИЯНИЕ ОТКАЧЕК ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОСЕДАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ МЕГАПОЛИСОВ

Ученые ряда стран, на территории которых зафиксированы значительные по размерам площади и глубине оседания городов, отмечают, что это

явление связано, главным образом, с мощными и длительными водозаборами подземных вод [18, 20, 22–24, 27 и др.]. На территории Китая в г. Сиань оседание поверхности на величину более 100 мм за период с 1950 по 2005 г. затронуло около 150 км², при этом максимальные значения оседания достигали 2800 мм, в г. Шанхае оседание поверхности на величину более 200 мм за период с 1921 по 2005 г. затронуло около 10000 км², а максимальные значения оседания достигали 2900 мм [26]. На территории г. Ханой площадью около 3325 км², в результате активного водопотребления на нужды города (более 1 млн м³/сут), образовались многочисленные депрессионные воронки и произошли оседания поверхности: на станции, Тханьконг оседание поверхности составило 323 мм (1996–2004 гг.), Фапван – 189.14 мм (1996–2005 гг.), Хайдинь – 131.83 мм (1997–2004 гг.) (рис. 1) [18]. В долине Санта-Клара (Калифорния) снижение уровня подземных вод хорошо коррелировало с проседанием массива грунта (рис. 2) [25]. Таким образом, отмечается близость зависимостей водоотбора и оседания земной поверхности в разных странах и регионах. Оседание поверхности территории особенно опасно для прибрежных городов в связи с “наступлением” акватории на сушу.

На территории России в результате активного водоотбора сформировались региональные области депрессии подземных вод, максимальные понижения уровней подземных вод в которых превышают 50 м (по состоянию на 2019 г.) (табл. 1),

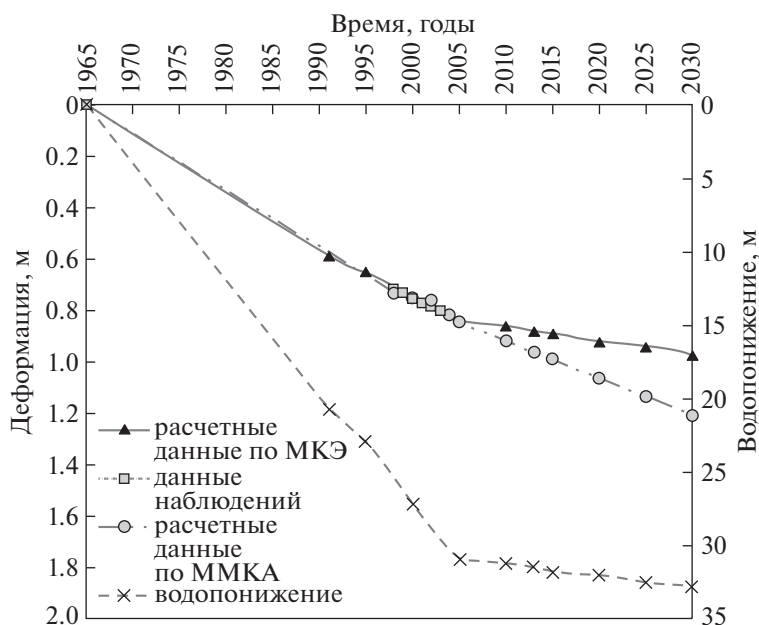


Рис. 1. Оседание земной поверхности в связи с добычей подземных вод на станции Хайдинь (Ханой, Вьетнам) [18]. В условных обозначениях: МКЭ – метод конечных элементов, ММКА – метод многофакторного корреляционного анализа.

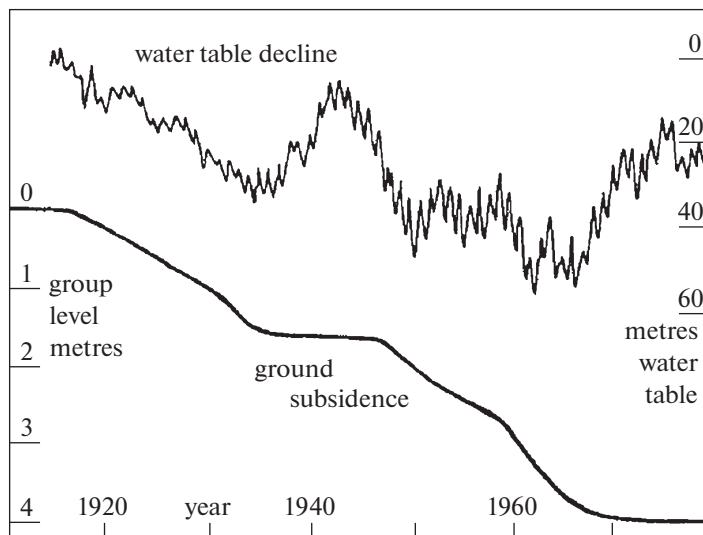


Рис. 2. Характер снижения уровня подземных (water table decline) (м, по вертикальной оси справа) и оседания поверхности массива грунта (ground subsidence) (м, по вертикальной оси слева) в долине Санта-Клара (Калифорния) во времени (year) [25].

что безусловно отражается на всех компонентах геологической среды и развивающихся в ее границах геодинамических процессах.

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ МЕГАПОЛИСОВ

Непрерывно развивающиеся и нарастающие техногенные изменения режима подземных вод, как и геологической среды в целом [10], обуславливают необходимость составления долгосрочных прогнозов для оценки их опасности, риска негативного проявления и принятия своевременных управляющих решений.

В полной мере это относится и к долгосрочному прогнозированию подтопления застроенных

территорий, которому, несмотря на изученность данного процесса [6–8, 17], пока не уделяется должного внимания. В этом направлении в начале 2000-х гг. на кафедре инженерной геологии и геоэкологии Московского государственного строительного университета (МГСУ) для студентов ряда факультетов читался специальный курс “Инженерная защита от затопления и подтопления территорий”, проводились теоретические и аналитические исследования [9], в том числе в рамках научно-исследовательских работ студентов. Для долгосрочного прогнозирования подтопления территории Москвы в качестве исходных базовых данных были приняты материалы, приведенные в статье В.И. Осипова [17] и монографии “Москва: геология и город” [16], и разработана следующая методическая последовательность решения поставленной задачи:

1. Установление распределения площадей административных районов города по степени фактической пораженности подтоплением на известный период времени (в данном случае 1992 г.);

2. Выявление закономерности приращения площади подтопления территорий за последующий период (на 2010 г. по данным прогноза, приведенного в [17]) в зависимости от ее пораженности этим процессом в 1992 г. Было установлено, что с увеличением исходной площади (F) территории, пораженной подтоплением, величина дальнейшего приращения подтопления (ΔF) снижается (рис. 3).

3. Составление типовых моделей геологической среды г. Москвы по степени подверженности подтоплению на основе анализа разработанной Г.А. Голодковской типизации геологической

Таблица 1. Понижение уровня некоторых областей депрессии территории России (по данным Мониторинга подземных вод на территории РФ. Интерактивная карта по состоянию на 19.08.21 г. Электронный ресурс: <http://geomonitoring.ru:13158/>)

Наименование области депрессии подземных вод	Максимальное понижение уровня подземных вод, м
Курская	99.7
Московская	90.0
Кропоткинско-Краснодарская	88.9
Брянская	75.7
Ленинградская	66.2
Тульская	52.5

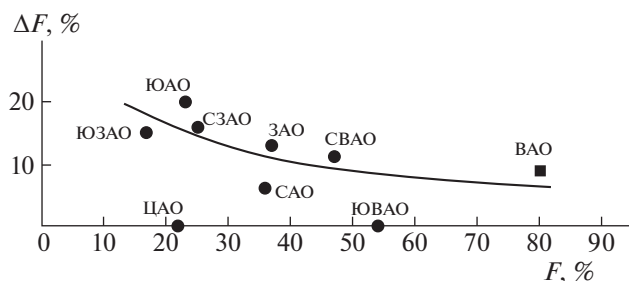


Рис. 3. Зависимость прогноза [17] приращения площади подтопления территории административных округов г. Москвы (аббревиатура на графике) в 2010 г. от зафиксированной в 1992 г. (по [3]).

среды города с выделением в его старых границах 12-ти инженерно-геологических районов [5, 16]. Было составлено 5 типов моделей геологической среды города, существенно различающихся по условиям потенциального подтопления (рис. 4). При этом не рассматривалась возможность подтопления за счет межпластовых вод в случаях увеличения их напоров и прорыва в строительные котлованы и подземные выработки глубокого заложения;

4. Расчет соотношения площадей инженерно-геологических районов Москвы, входящих в границы административных округов города, в том числе с учетом составленных типовых моделей геологической среды с разной степенью подверженности подтоплению;

5. Прогнозирование подтопления территорий административных округов города на отдаленный период (2025 г.) с учетом выявленных закономерностей в динамике этого процесса и различной степени подверженности этому процессу геологической среды, занимаемой административными округами;

6. Установление категории опасности территорий административных округов г. Москва по степени пораженности их площади (F) подтоплением с учетом положений действовавшего в то время СНиП 22-01-95, разработанного под руководством А.Л. Рагозина в 1994–1995 гг., который позднее был актуализирован¹. При этом в дополнение к категориям опасности подтопления, установленным А.Л. Рагозиным (умеренно опасные – F менее 50%, опасные – 50–75% и весьма опасные – более 75%), были выделены потенциально опасные (F от 40% до 50%) и потенциально весьма опасные территории (F от 60% до 75%);

7. Оценка, с учетом выполненных прогнозов, динамики развития техногенного подтопления за период 1992–2025 гг.

¹ СП 115.13330.2016 Свод правил. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202>

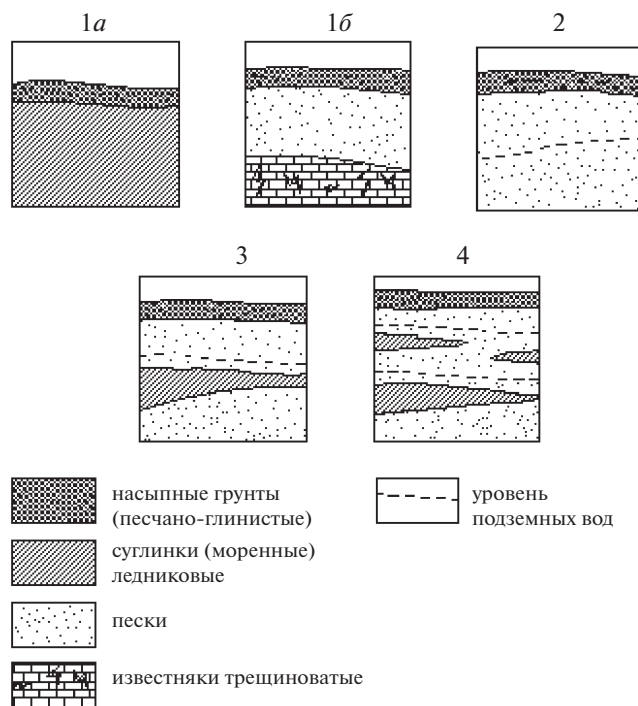


Рис. 4. Типовые модели геологической среды Москвы по подверженности подтоплению [10]: 1 – не подтапливаемая в связи со значительной мощностью глинистых грунтов в верхней части разреза (1а) или в связи с хорошей дренированностью верхних слоев песчаных грунтов (1б); 2 – с низким потенциалом подтопления в связи с весьма глубоким залеганием грунтовых вод, подтопление возможно только на участках залегания тонкозернистых песков; 3 – со средним потенциалом подтопления в связи с достаточно большой глубиной залегания грунтовых вод; 4 – с высоким потенциалом подтопления в связи с неглубоким залеганием уровня грунтовых вод.

Все многочисленные аналитические расчеты и графические построения выполнены Р.Т. Бутаевым в 2004 г., итоговые результаты исследований были доложены им в 2005 г. на конференции по итогам НИРС студентов МГСУ. Они были также отражены в докладе на конференции МГУ 2007 г. [10] и частично опубликованы в 2008 г. в сборнике трудов МГСУ “Денисовские чтения” [3].

Общее представление о фактическом (1992 г.) и прогнозируемом подтоплении территории Москвы в 2005, 2010 и на 2025 годы дают табл. 2 и рис. 5.

Проведенные аналитические исследования показали, что подтопление территорий г. Москвы носит прогрессирующий характер. По данным прогноза (табл. 2), видно непрерывное повышение со временем размера площади поражения подтоплением практически во всех административных округах города. По всей территории города подтопленные площади увеличились в 1.1–2.4 раза

Таблица 2. Сводные данные по зафиксированному на 1992 г. и прогнозируемому на последующие годы подтоплению территорий административных округов г. Москвы [3, 17]

Административный округ	Площадь подтопления, %			
	1992 г.	2005 г.	2010 г.	2025 г.
ЦАО	22	22	22	25
ЮЗАО	17	28	32	40
СЗАО	25	36	41	45
САО	36	40	42	45
ЮАО	23	37	43	50
ЗАО	37	46	50	55
ЮВАО	54	54	54	60
СВАО	47	55	58	65
ВАО	80	86	89	92

(с 17–80% в 1992 г. до ожидаемых 25–92% к 2025 г.).

Вместе с тем, что не менее важно, одновременно возрастает категория опасности подтопления. Так, по сравнению с 1992 г., к 2025 г. ожидается увеличение числа административных округов Москвы, относимых по подтоплению к категории “опасное” с одного (ЮВАО) до четырех (СВАО, ЮВАО, ЗАО и ЮАО, при этом ЮВАО и СВАО оцениваются как “потенциально весьма опасные”), при сохранении категории “весьма опасное” у ВАО и условного отнесения к категории “потенциально опасное” САО.

Следует заметить, что на рубеже XX и XXI вв. трудно было предположить те высочайшие темпы строительства и реконструкции на территории Москвы, включая огромные объемы возведения подземных сооружений значительного заглубления, которые были реализованы в последние десятилетия и могли заметно сказаться на характере подтопления городских территорий. Поэтому указанный прогноз безусловно нуждается в проверке и уточнении на базе анализа накопившихся фондовых материалов. Вместе с тем есть основания утверждать, что реализованная методика долгосрочного прогнозирования динамики техногенного подтопления мегаполиса является обоснованной и может использоваться при составлении дальнейших прогнозов.

ИЗМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ИХ РЕЖИМА

Необходимо подробнее остановиться на таком важном аспекте техногенных изменений режима подземных вод, как изменение градиента верти-

кальной фильтрации (i_v) – параметр, который часто недооценивается, и в оценке значимости которого не существует единого мнения. Это во многом объясняется тем, что ранее не обращали внимание на вероятность существенного возрастания его величины под влиянием техногенных факторов. Именно по этой причине градиент вертикальной фильтрации имеет существенное значение для территорий, подверженных карсту и карстово-суффозионным процессам, так как при достижении критических значений i_v может произойти разрыв слоя верхнего водоупора межпластовых напорных вод (в том числе регионально-го) с последующим развитием карстово-суффозионного процесса.

Для таких территорий опасные возрастания величины градиента вертикальной фильтрации могут быть вызваны повышением уровня грунтовых вод при подтоплении застроенной территории и снижением пьезометрического уровня межпластовых напорных вод (водовмещающими породами которых являются закарстованные известняки, доломиты и мел) в связи с мощными водозаборами для технического и питьевого водоснабжения. Часто наблюдается сочетанное изменение уровней этих водоносных горизонтов. В ряде случаев сказываются и длительные откачки подземных вод при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, в первую очередь метрополитена.

Как известно, вычисление значения градиента вертикальной фильтрации выполняется по формуле $i_v = \Delta H / m$, где: ΔH – величина напора – расстояние между уровнем грунтовых вод (УГВ) и пьезометрическим уровнем установления напорных вод (ПУНВ), а m – мощность водоупорного слоя глин.

Считается, что при $i_v > 3$ развивается карстово-суффозионный процесс, так как при таких его значениях возможен разрыв водоупорного слоя глин, во всяком случае существует высокая вероятность развития данного процесса [1, 2, 12, 15, 19].

Рассмотрим ряд возможных и характерных ситуаций, представленных на рис. 6. На схеме рис. 6а показаны исходные природные условия, в которых на территории карстово-суффозионные процессы не развиваются в связи с низким значением градиента вертикальной фильтрации (в данном примере $i_v = 1$).

При техногенном подтоплении рассматриваемой территории (см. рис. 6б) величина градиента вертикальной фильтрации возрастает, но в условиях неизменного пьезометрического уровня остается недостаточной для развития карстово-суффозионного процесса (в данном примере $i_v = 2$). Соответственно, территория считается не опасной в карстово-суффозионном отношении, как и в первом случае.

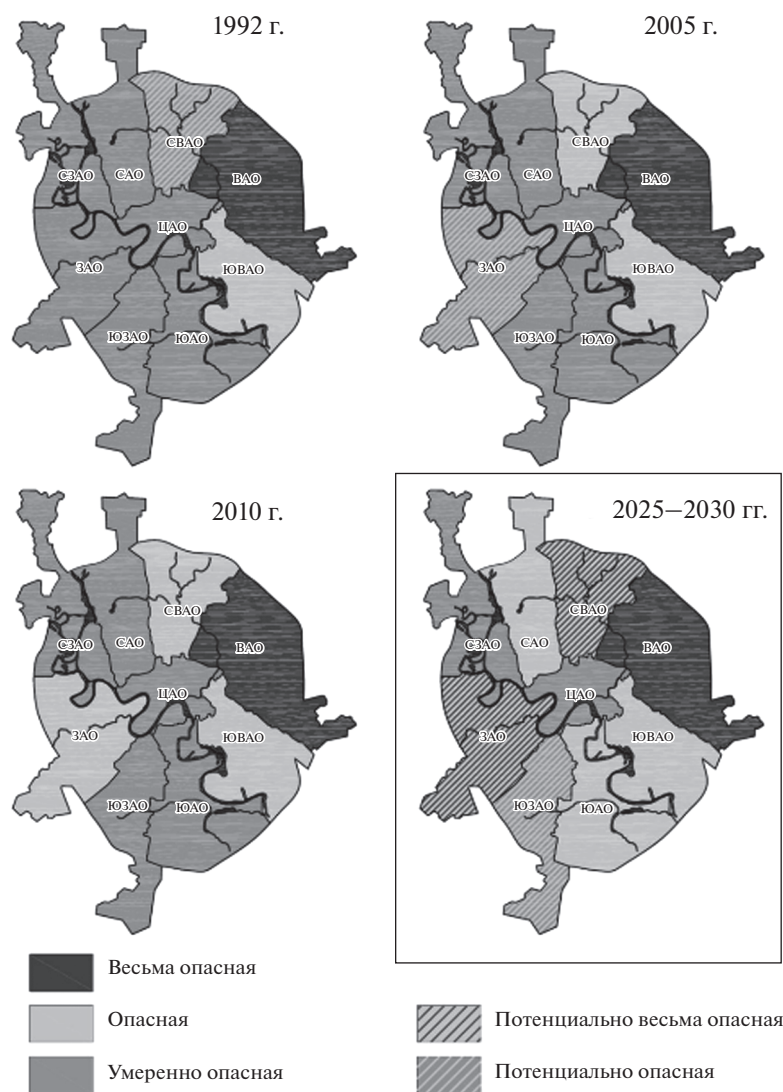


Рис. 5. Прогноз динамики изменения категории опасности подтопления территорий административных округов Москвы в период с 1992 по 2025 гг. [3].

При техногенной сработке (срезке) ПУНВ, происходящей под влиянием значительной откачки напорных вод для технического и/или питьевого водоснабжения (см. рис. 6а), градиент вертикальной фильтрации может существенно возрасти даже в отсутствии подтопления территории (в данном примере $i_v = 3$, т.е. до критической величины).

В этом случае территория переходит в категорию потенциально опасной в карстово-суффозионном отношении, и могут потребоваться превентивные мероприятия, исключающие возможность возникновения этого опасного процесса. Например, ограничение скорости сработки ПУНВ до допустимого предела. Подобная рекомендация целесообразна в аналогичных и некоторых иных случаях. Необходимость такого меро-

приятия была обоснована, например, в научно-техническом отчете МГСУ по результатам натурных и лабораторных исследований для проектировавшейся Ново-Воронежской АЭС. Исследования проводились МГСУ по договору с АЭП группой ученых и специалистов, в том числе А.В. Аникеевым, Н.Г. Анисимовой В.А. Болтуновым, И.В. Дудлером (научн. руков. и отв. исп.), И.А. Кожевниковой, А.В. Кольцовой, В.М. Кутеповым, В.П. Хоменко.

На рис. 6б показана ситуация техногенного изменения режима подземных вод с сочетанным проявлением на застроенной территории процессов подтопления и сработки/срезки ПУНВ. В данном примере $i_v = 4$, т.е. величина градиента вертикальной фильтрации превышает критическое значение, и поэтому развитие карстово-суфф-

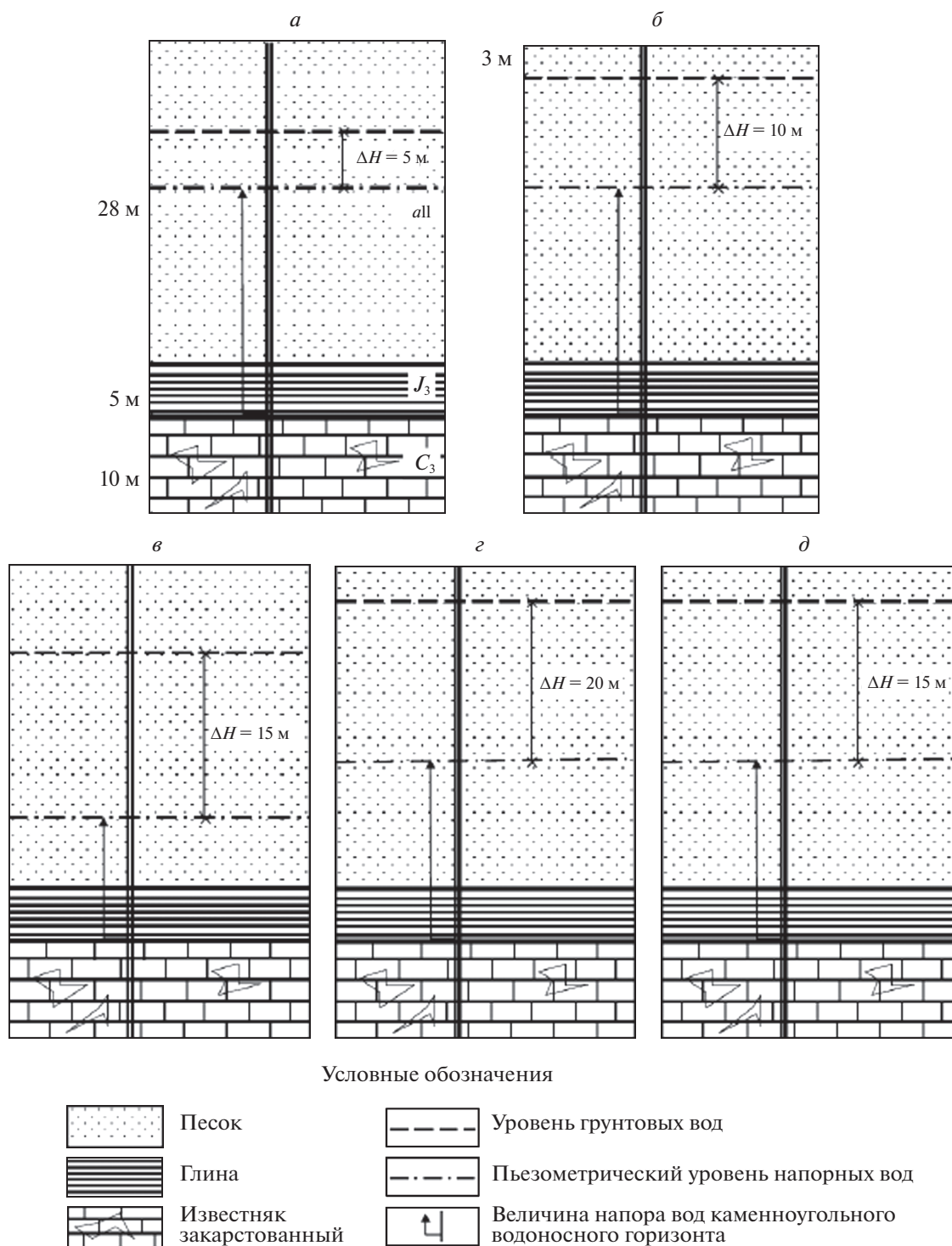


Рис. 6. Динамика изменения величины градиента вертикальной фильтрации при техногенном изменении режима подземных вод (на примере территории распространения карста): *а* – в природном состоянии, до развития подтопления и сработки ПУНВ карбонатного водоносного горизонта ($i_v = 1$); *б* – при развитии техногенного подтопления территории ($i_v = 2$); *в* – в отсутствии подтопления территории при срезке ПУНВ ($i_v = 3$); *г* – при одновременном подтоплении территории и срезке ПУНВ ($i_v = 4$); *д* – при частичном восстановлении ПУНВ на подтопленной территории ($i_v = 3$).

фозионного процесса становится возможным, весьма вероятным. В связи с этим эту территорию следует относить к безусловно опасным в карсто-

во-суффозионном отношении, и требуется расчет риска проявления данного процесса и разработка мероприятий по его предотвращению.

На некоторых подтопленных территориях может происходить частичное восстановление ПУНВ, (например, при временном прекращении откачек или ликвидации промышленных объектов с водоснабжением на базе подземных напорных вод). В таких условиях величина градиента вертикальной фильтрации также частично снижается (в примере на рис. 6 до $i_v = 3$), однако надо учитывать, что еще до этого снижения могли произойти частичные деформации водоупорного слоя глин, и даже начаться суффозия песков в карстовые полости. Кроме того, водоупорный слой глин мог быть нарушен многочисленными глубокими инженерно-геологическими скважинами, при ликвидации которых их кольматаж был выполнен не качественно или не осуществлялся. В таком случае сохраняется опасность развития карстово-суффозионных процессов, поэтому необходимы специальные исследования, мониторинг и, возможно, реализация системы мероприятий инженерной защиты строительных объектов и застроенной (реконструируемой) территории.

В связи с указанной значимостью данных о величинах i_v , их изменении со временем и распределении в границах изучаемой территории, представляется необходимым при проведении инженерных изысканий предусматривать включение в комплект гидрогеологических карт и карту градиентов вертикальной фильтрации, что особенно актуально для территорий распространения пород, подверженных карсту и карстово-суффозионным процессам. Как подчеркивали В.М. Кутепов и В.Н. Кожевникова, в этих условиях сопоставление карты градиентов вертикальной фильтрации с геологическими картами *“позволяет провести инженерно-геологическое районирование территории по интенсивности развития рассматриваемых процессов на данный момент и построить прогнозные карты на любой момент времени, если известны закономерности изменения уровней грунтовых и карстовых вод во времени”* [14, с. 82]. Очевидно также, что в отчетной документации должны указываться не только сведения о периоде времени замеров уровней подземных вод, использованных при составлении карты градиентов вертикальной фильтрации, и дате выпуска карты, но и рекомендуемый срок пользования ею без дополнительной корректировки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные выше соображения и приведенные данные свидетельствуют о необходимости системного подхода к изучению и учету техногенных изменений режима подземных вод на застроенных территориях, прежде всего мегаполисов, где негативные последствия геоэкологического, инженерно-геологического и гидрогеологиче-

ского характера могут проявляться наиболее интенсивно. В частности, необходимы введение понятия о категориях опасности техногенного изменения режима подземных вод и разработки критериев для установления этих категорий, организация гидрогеологического мониторинга на застроенных территориях, разработка методики и составление долгосрочных гидрогеологических прогнозов, включение карты градиента вертикальной фильтрации в состав комплекта гидрогеологических карт, составление на основе тематического, аналогового и физического моделирования динамических гидрогеологических моделей территории города и его административных округов, а также особо опасных и технически сложных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 325 с.
2. *Аникеев А.В.* Провалы и оседания земной поверхности в карстовых районах: моделирование и прогноз: автореф. дис. ... докт. геол.-мин.н. М.: ИГЭ РАН, 2014. 47 с.
3. *Бутаев Р.Т.* К вопросу о долгосрочном прогнозировании техногенного подтопления мегаполисов // В сб. IV Денисовские чтения. “Проблемы обеспечения экологической безопасности строительства”. М.: МГСУ, 2008. С. 138–140.
4. *Голодковская Г.А., Демидюк Л.М.* Некоторые методологические вопросы оценки техногенных изменений геологической среды // Комплексные оценки и прогноз техногенных изменений геологической среды: [Материалы семинара, дек. 1983 г.] / Отв. ред. В.Т. Трофимов. М.: Наука, 1985. С. 11–17.
5. *Голодковская Г.А., Лебедева Н.И.* Инженерно-геологическое районирование территории Москвы // Инженерная геология. 1984. № 3. С. 87–102.
6. *Горловский Б.Л., Шехтман Л.М.* Техногенное подтопление площадок АЭС и ТЭС // Энергетика и электрофикация: обзорная информация. Вып. 3. Серия 3. Атомные электростанции. М.: Информ-энерго, 1986. 58 с.
7. *Дзекцер Е.С.* Концепция защиты исторического города от подтопления (на примере г. Ростова Велик.). М.: ГУП ЦПП, 1999. 52 с.
8. *Дзекцер Е.С., Пырченко В.А.* Технология обеспечения устойчивого развития урбанизированных территорий в условиях воздействия природных опасностей. М.: ЗАО “ДАР/ВОДГЕО”, 2004. 166 с.
9. *Дудлер И.В.* Классификация застраиваемых и застроенных территорий по подтоплению // I Денисовские чтения. М.: МГСУ, 2000. С. 42–49.
10. *Дудлер И.В., Воронцов Е.А., Бутаев Р.Т.* Литотехнический мониторинг на городских территориях: концепция, методика, принципы, направления использования // Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем:

- тр. междунар. научн. конф. / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: МГУ, 2007. С. 47–48.
11. 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.
 12. Козлякова И.В., Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Кожевникова И.А. Оценка карстово-суффозионной опасности в Москве для управления карстовым риском в масштабах города // Управление рисками чрезвычайных ситуаций: сб. трудов конф. (доклады и выступления). 2001. С. 205–207.
 13. Комплексная оценка и прогноз техногенных изменений геологической среды: [Материалы семинара, дек. 1983 г.] / Отв. ред. В. Т. Трофимов. М.: Наука, 1985. 103 с.
 14. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Комплексная оценка устойчивости массивов пород в карстовых районах при техногенном воздействии / Комплексная оценка и прогноз техногенных изменений геологической среды: [Материалы семинара, дек. 1983 г.] / Отв. ред. В. Т. Трофимов. М.: Наука, 1985. С. 79–85.
 15. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология. 2011. № 3. С. 215–226.
 16. Москва: геология и город / Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева М.: Московские учебники и картография, 1997. 400 с.
 17. Осипов В.И. Зоны геологического риска на территории г. Москвы // Вестник РАН. 1994. Т. 64. № 1. С. 32–45.
 18. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Карты прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханое (Вьетнам) // Геоэкология. 2016. № 6. С. 543–556.
 19. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. н.: М., 2004. 38 с.
 20. Cabral-Cano E., Dixon T.H., Miralles-Wilhelm F., Diaz-Molina O., et al. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City // Geological Society of America Bulletin. 2008. V. 120 (11). P. 1556–1666.
 21. 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 Intern. Simp. and 9th Asian Reg. Conf. of IAEG. 2013. P. 575–580.
 22. Phien-wej N., Giao P.H., Nutalaya P. Land subsidence in Bangkok, Thailand // Engineering Geology. 2006. V. 82. Is. 4. P. 187–201.
 23. 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.
 24. Sato C., Haga M., Nishino J. Land subsidence and groundwater management in Tokyo // Int. Review for Environmental Strategies. 2006. V. 6. № 2. P. 403–424.
 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. 45 (1). P. 123–135.
<https://doi.org/10.1007/s11069-007-9168-4>
 27. 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>

TECHNOGENIC CHANGES IN THE GROUND WATER REGIME IN THE BUILT-UP AREAS (GEOECOLOGICAL, ENGINEERING GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL ASPECTS)

V. V. Funikova^{a, #}, I. V. Dudler^{b, ##}, and R. T. Butaev^{c, ###}

^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

^c Alterkasa LLC, Moscow, 1st Truzhnikov per., 17 A, 119121 Russia

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

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

^{###}E-mail: butaev.r.t@gmail.com

The groundwater regime changes permanently under technogenic impact in the built-up areas, with groundwater being the most dynamic component of the geological environment. Attention is drawn to the complex changes in groundwater regime, resulting in a number of undesired geoecological, engineering geological and hydrogeological consequences, which control the difficulty of engineering geological conditions for construction. We assume certain cycles in technogenic changes in the groundwater regime and the geological en-

vironment as a whole, complying with the technological progress and the urban development level. The article covers briefly the surface subsidence in megacities typical for the XX and early XXI centuries caused by intense and long-term water intake for drinking and technical water supply. The importance of long-term predicting technogenic changes in the groundwater regime is emphasized, in particular, long-term flooding forecasts in Moscow. The special importance of monitoring and control over the vertical filtration gradient in built-up areas with a potential karst-suffusion hazard is shown. It is proposed to include a map of vertical filtration gradients in the set of hydrogeological maps for engineering survey. In conclusion, the need for a systematic approach to the study and consideration of technogenic changes in the groundwater regime is noted, including the arrangement of hydrogeological monitoring; inclusion of the vertical filtration gradient map in the set of hydrogeological maps; compilation of hydrogeological models of the city and its municipal districts, as well as especially hazardous and technologically complex engineering structures (based on mathematical, analogue and physical modeling); and long-term forecasting.

Keywords: groundwater, technogenic changes in the groundwater regime, geoecological, engineering geological and hydrogeological aspects

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapses and subsidence sinkholes in karst areas: formation mechanisms, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 325 p. (in Russian)
2. Anikeev, A.V. *Provaly i osedaniya zemnoi poverkhnosti v karstovykh raionakh: modelirovaniye i prognoz* [Collapses and subsidence of the day surface in karst areas: modeling and forecast]. Extended abstract Doct. (Geol.-Min. Sci.) dissertation, Moscow, IEG RAS, 2014, 47 p. (in Russian)
3. Butaev, R.T. *K voprosu o dolgosrochnom prognozirovaniye tekhnogennogo podtopleniya megapolisov* [About long-term forecasting of technogenic flooding in megacities]. IV *Denisovskie chteniya "Problemy obespecheniya ekologicheskoi bezopasnosti stroitel'stva"* [The 4th Conference in commemoration of N.Ya. Denisov "Problems of ensuring environmental safety in construction"]. Moscow, MGSU Publ., 2008, pp. 138–140. (in Russian)
4. Golodkovskaya, G.A., Demidyuk, L.M. *Nekotorye metodologicheskie voprosy otsenki tekhnogennykh izmeneniy geologicheskoi sredy* [Some methodological issues in assessing human-induced changes in geological environment] // *Kompleksnye otsenka i prognoz tekhnogennykh izmeneniy geologicheskoi sredy. Mater. Seminara, dek. 1983* [Combined assessment and prediction of human-induced changes in geological environment. Workshop Proc., Dec. 1983]. V.T. Trofimov, Ed.-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1985, p. 11–17.
5. Golodkovskaya, G.A., Lebedeva, N.I. *Inzhenerno-geologicheskoe raionirovaniye territorii Moskvy* [Engineering geological zoning of the Moscow territory]. *Inzhenernaya geologiya*, 1984, no. 3, pp. 87–102. (in Russian)
6. Gorlovskii, B.L., Shekhtman, L.M. *Tekhnogennoe podtoplenie ploshchadok AES i TES* [Technogenic flooding of NPP and Thermal power plant sites]. *Energetika i elektrofikatsiya: obzornaya informatsiya* [Energy and electrification: overview]. Issue 3, series 3. Nuclear power plants. Moscow, Informenergo Publ., 1986. 58 p. (in Russian)
7. Dzehtser, E.S. *Kontseptsiya zashchity istoricheskogo goroda ot podtopleniya: (Na primere g. Rostova Velik.)* [The concept of protecting a historical town from flooding (by the example of Rostov the Great). Moscow, GUP CPP, 1999. 52 p. (in Russian)
8. Dzehtser, E.S., Pyrchenko, V.A. *Tekhnologiya obespecheniya ustoichivogo razvitiya urbanizirovannykh territorii v usloviyakh vozdeystviya prirodnnykh 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)
9. Dudler, I.V. *Klassifikatsiya zastraivaemykh i zastroyemykh territorii po podtopleniyu* [Classification of built-up areas and areas under development according to flooding]. I *Denisovskie chteniya* [Proc. of the first conference in commemoration of N.Ya. Denisov]. Moscow, MGSU, 2000, pp. 42–49. (in Russian)
10. Dudler, I.V., Vorontsov, E.A., Butaev, R.T. *Litotekhnicheskii monitoring na gorodskikh territoriyakh: kontseptsiya, metodika, printsipy, napravleniya ispol'zovaniya* [Lithotechnical monitoring in urban areas: the concept, methods, principles, and ways of application] *Monitoring geologicheskikh, litotekhnicheskikh i ekologicheskikh sistem: Tr. Mezhd. nauchnoi konf.* [Monitoring of geological, lithotechnical and ecological and geological systems. Proc. Int. Sci. Conf.]. V.T. Trofimov, V.A. Korolev, Eds., Moscow, MSU Publ., 2007, pp. 47–48. (in Russian)
11. 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)
12. Kozlyakova, I.V., Kutepov, V.M., Anisimova, N.G., Kozhevnikova, I.A. *Otsenka karstovo-suffuzionnoi opasnosti v Moskve dlya upravleniya karstovym riskom v masshtabakh goroda* [Assessment of karst-suffusion hazard in Moscow to manage karst risk on a city level]. *Upravlenie riskami chrezvychaynykh situatsii. Doklady i vystupleniya* [Emergency risk management. Proc. of the Conf. reports and speeches]. 2001, pp. 205–207. (in Russian)

13. *Kompleksnye otsenka i prognoz tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy. Mater. Seminara, dek. 1983* [Combined assessment and prediction of human-induced changes in geological environment. Workshop Proc., Dec. 1983]. V. T. Trofimov, Ed.-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1985, 103 p.
14. Kutepov, V.M., Kozhevnikova, V.N. *Kompleksnaya otsenka ustoichivosti massivov porod v karstovykh raionakh pri tekhnogenom vozdeistvii* [Combined assessment of rock massif stability in karst-prone areas upon human impact]// *Kompleksnye otsenka i prognoz tekhnogennykh izmenenii geologicheskoi sredy. Mater. Seminara, dek. 1983* [Combined assessment and prediction of human-induced changes in geological environment. Workshop Proc., Dec. 1983]. V.T. Trofimov, Ed.-in-chief, Moscow, Nauka Publ., 1985, p. 79–85.
15. Kutepov, V.M., Kozlyakova, I.V., Anisimova, N.G., Eremina, O.N., Kozhevnikova, I.A. *Otsenka karstovoi i karstovo-suffuzionnoi opasnosti v proekte krupnomasshtabnogo geologicheskogo kartirovaniya g. Moskvy* [Assessment of karst and karst-suffusion hazards in the project of large-scale geological mapping of Moscow]. *Geoekologiya*, 2011, no. 3, pp. 215–226. (in Russian)
16. *Moskva. Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds., Moscow, *Moskovskie uchebniki i Kartolitografiya*, 1997, 400 p. (in Russian)
17. Osipov, V.I. *Zony geologicheskogo riska na territorii g. Moskvy* [Geological risk zones in the territory of Moscow]. *Vestnik RAN*, 1994, vol. 64, no. 1, pp. 32–45. (in Russian)
18. Fi, Kh.T., Strokova, L.A. *Karty prognoza osedaniya zemnoi poverkhnosti v rezul'tate izvlecheniya podzemnykh vod v gorode Khanoe (V'etnam)* [Maps of subsidence forecast on the day surface as a result of groundwater extraction in Hanoi (Vietnam)]. *Geoekologiya*, 2016, no. 6, pp. 543–556. (in Russian)
19. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecast of suffusion processes]. Extended abstract Doct. (Geol.-Min. Sci.) dissertation, Moscow, 2004, 38 p. (in Russian)
20. Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Diaz-Molina, et al. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, vol. 120, no. 11, pp. 1556–1666.
21. Doudler, I.V., Vorontsov, E.A., Liarski, S.P. Engineering geology priorities in XXI century. In: *Global View of Engineering Geology and the Environment. Proc. of the Intern. Simp. and 9th Asian Reg. Conf. of IAEG*, 2013, pp. 575–580.
22. Phien-wej, N., Giao, P.H., Nutalaya, P. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 2006, vol. 82, no. 4, pp. 187–201.
23. Pirouzi, A., Eslami, A. Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. *Int. Journal of Geo-Engineering*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1–21.
24. Sato, C., Haga, M., Nishino, J. Land subsidence and groundwater management in Tokyo. *International Review for Environmental Strategies*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 403–424.
25. Waltham, T. Sinking cities – Feature. *Geology Today*, 2002, vol. 18, no. 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. 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>