

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕСЧАНЫХ И СУПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПОКРОВНОЙ ТОЛЩИ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНОГО КАРСТА

Проблема оценки суффозионной опасности в районах развития карстующихся отложений, перекрытых мощной толщей песчаных и супесчаных пород, носит весьма актуальный характер. Если суффозию определить как разрушение дисперсных и сцементированных обломочных пород и последующий вынос потоком подземных вод грунтовых частиц [13], то наибольшую опасность для хозяйственной деятельности человека в районах, где в разрезе перекрывающих карстующиеся породы отложений присутствуют суффозионно неустойчивые грунты, носят так называемые постсуффозионные процессы, к которым можно отнести: обрушение, истечение, прогиб грунтов перекрывающей толщи [13]. Так или иначе, все перечисленные процессы осложняют хозяйственное освоение территории и связаны с высокими природными рисками.

Карстовый массив является по сути геосистемой, стремящейся к равновесному состоянию, однако в случае морфологического, гидродинамического и гидрохимического дисбаланса возможна активизация целого ряда явлений. Именно в пределах элементов ослабления массива, которыми могут служить карстовые полости и зоны разуплотнения (дробления) карстующихся пород, возможно создание необходимых условий для активизации суффозионного процесса [6]. Карстовый процесс, в результате которого происходит дезинтеграция массива скальных пород, относится к одному из условий возникновения суффозии [13]. Следовательно, в районах развития карстующихся пород, перекрытых несвязными отложениями, повышается вероятность возникновения и развития суффозионного процесса в парагенезисе с карстовым. Растворение карстующихся отложений и, как результат, увеличение пустотности, дезинтеграция пород, расширение отдельных трещин и мест их пересечения может привести к суффозионному выносу вышележащих

грунтов в трещинно-полостную систему, сопровождающемуся оседанием земной поверхности, которое в свою очередь может вызвать деформации инженерных сооружений [12].

Устойчивость песчаной толщи определяется аккумуляционной емкостью подстилающих отложений, то есть их способностью принимать и накапливать несвязные и раздробленные связные грунты. В качестве аккумуляционной емкости в массиве выступают объемы трещинно-полостных коллекторов, чаще всего представляющие собой крайне сложную систему гидравлически связанных полостей, размеры которых заранее неизвестны [1]. В ходе развития суффозионного процесса первичные карстовые или суффозионные полости могут изменить форму, частично или полностью заполниться дисперсным материалом. Возможно и возникновение вторичной полости выше по разрезу [13].

Процесс механической суффозии может представлять опасность лишь в том случае, когда имеются условия для транспортировки фильтрационным потоком продуктов суффозии за пределы той зоны, в которой развивается суффозия. Если зона оказывается замкнутой, то, как правило, суффозионные процессы в ней быстро затухают после незначительного перетолжения мелких частиц и закупорки ими участков выхода фильтрационного потока из этой зоны [10].

В противном случае, при наличии приемника дисперсного материала, достаточно длительный по времени процесс суффозионного выноса частиц грунта из толщи перекрывающих отложений ухудшает состояние и прочностные характеристики массива горных пород, вследствие чего на поверхности могут формироваться отрицательные формы рельефа. Разумеется, наиболее интенсивно суффозионный процесс развивается в условиях отсутствия разделяющего водоупора, когда карстующиеся породы перекрыты толщей рыхлых отложений [9].

При наличии глинистого водоупора в подошве перекрывающей толщи – одной из причин суффозии – фактором, ее инициирующим, является, согласно В.П. Хоменко [13], разрушение глинистого водоупора над полостями, которое происходит, во-первых, в результате прогиба водоупора в полость вследствие ее расширения, увеличения давления на кровлю водоупора или снижения гидростатического давления трещинно-карстовых вод, во-вторых, в результате случайного гидроразрыва, причиной которого может послужить снижение пьезометрического уровня трещинно-карстовых вод, в-третьих, в результате расклинивающего действия воды между глинистыми частицами при подъеме уровня вод трещинно-карстового горизонта и замачивания подошвы водоупора.

История геологического развития Московской синеклизы свидетельствует о формировании необходимых условий для развития суффозионного процесса в парагенезисе с карстовым. В каменноугольный период формировались мощные толщи карбонатных пород, перекрытые в юрско-меловой этап геологической истории глинистыми и песчаными отложениями, фрагментарно уничтоженными денудационными процессами в четвертичный период. Кроме того, серия ледниковых и межледниковых эпох в четвертичный период определила геологический разрез четвертичной системы: в периоды оледенений накапливался преимущественно суглинистый материал с галькой и валунами различных пород, в межледниковье – преимущественно мощные толщи озерно-болотных, аллювиальных и водноледниковых песчаных отложений.

В качестве объекта исследования суффозионной опасности выбрана территория в пределах Московской области, юго-западнее города Ногинска, являющаяся участком проектируемой высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань.

В структурно-тектоническом отношении участок приурочен к восточному крылу Подмосковной впадины Московской синеклизы, весьма стабильной тектонической структуре, которая, однако, в позднекайнозойское время находилась в условиях неотектонической активности, обусловленной субмеридиональным сжатием. Как следствие, слои каменноугольных отложений и частично юрско-меловых пород пронизаны густой сетью неотектонических трещин, преимущественно субмеридионального простирания. Именно на участках повышенной плотности открытых трещин, особенно их пересечения, где отмечается интенсивный водообмен, возможна активизация карстово-суффозионного процесса [8].

Карстующиеся каменноугольные известняки относятся к труднорастворимым горным породам, тем не менее, на исследуемом участке площадью 48,6 км² зафиксировано 55 карстовых полостей, из которых 21 является незаполненной. Мощность полостей колеблется в пределах от 0,1 до 0,4 м, в среднем равняясь 0,2 м. Кроме того, отмечается весьма разуплотненный характер толщи пород: на исследуемом участке в результате инженерно-геологического и карстологического бурения 346 скважинами зафиксировано 784 зоны дробления. Характерной чертой исследуемого карстового массива является неглубокое залегание карстующихся пород – от 1,8 до 34,0 м при среднем значении 11,3 м.

Наличие карстовых полостей, обусловлено сложной геологической историей данного региона, а именно, интенсивным развитием карста во время континентальных перерывов (с конца каменноугольного времени до поздней юры, с конца мезозоя до наступления днепровского ледника и в средне-четвертичное время). В эти периоды происходил размыв ранее отложившихся осадков, происходило образование глубоких речных врезов, и создавались благоприятные условия для проникновения в толщу известняков относительно пресных подземных вод. Выявленные при бурении зоны трещиноватости с большой степенью вероятности могут иметь тектоническую природу – результат субмеридионального регионального сжатия и локального деформирования пород во время формирования осложняющих синеклизу структур более низкого порядка [8].

На большей части исследуемого участка карстующеся породы перекрыты толщей водопроницаемых отложений – четвертичными песками, за исключением участков, где на известняках залегают относительно маломощные пестроцветные глинистые отложения карбона – в начале исследуемого участка трассы, севернее н.п. Электроугли, в центральной части, западнее н.п. Колонтаево. Каменноугольные глинистые отложения в основном обладают твердой или полутвердой консистенцией, могут содержать песчаные прослои. Другой тип распространенного в исследуемом районе относительно глинистого водоупора, препятствующего суффозионному выносу песчаных грунтов в карстовые полости – юрские глины, развит весьма ограниченно, отмечен фрагментами в центральной и восточной частях исследуемой территории. Мощность комплекса колеблется от 0,3 м до 16,0 м, при среднем значении 5,0 м. Юрские глины характеризуются окраской от черной до зеленовато-черной, от полутвердой до твердой консистенции, с прослоями супеси, с щебнем, галькой, дресвой, встречаются скелетные остатки белемнитов. В западной части исследуемого

участка выделяется комплекс пород юрско-мелового возраста, сложенный кварцево-глауконитовыми песками мелкой и пылеватой фракций.

Геоморфологическое положение территории в пределах правобережной части долины р. Клязьмы, осложненной долиной ее притока – р. Шаловки, определило характер разреза четвертичных отложений. Практически повсеместным распространением характеризуются песчаные отложения аллювиального генезиса, при удалении от русла р. Клязьмы латерально сменяющиеся флювиогляциальными.

Исследуемая территория расположена в пределах Мещерской низменности, представляющей собой доледниковое тектоническое понижение, заполненное в кайнозойское время водно-ледниковыми песчаными и супесчаными отложениями. Моренные глинистые образования в пределах описываемого геоморфологического элемента встречаются редко, в основном на возвышенных участках рельефа [3].

Таким образом, геологические условия исследуемого района создают все необходимые предпосылки для возникновения и развития суффозионного процесса и формирования постсуффозионных изменений в карстовом массиве.

Суффозионный процесс, протекающий в парагенезисе с карстовым, так же как и последний, отличается спонтанным характером проявления на земной поверхности, осложняющим прогнозирование появления участков постсуффозионных изменений – отрицательных форм рельефа. Однако анализ совокупности природных условий, так или иначе влияющих на протекание суффозионного процесса, позволяет проводить категорирование территорий по потенциальной суффозионной опасности с последующим ее прогнозированием на локальном уровне исследований.

Проблема анализа суффозионной опасности в районах развития карста в рамках системного подхода к проблеме изучения карстоопасности в данном исследовании может быть сведена главным образом к установлению количественно-качественных характеристик карстового массива, интегральному анализу набора факторов, влияющих на процесс суффозии, для получения характеристик устойчивости территории [7].

В качестве факторов развития суффозионного процесса на исследуемой территории выбраны характеристики карстового массива, однозначно позволяющие определить особенности изучаемого процесса. К факторам, характеризующим состояние песчаных и супесчаных отложений в покровной толще и возможность их суффозионного выноса, относятся суффозионность грунтов и литологический состав покровной толщи, определяемый песчанистостью

отложений и мощностью глинистых прослоев в разрезе. Гидрогеологические условия определяются глубиной залегания уровня грунтовых вод (УГВ) и напором трещинно-карстовых вод.

Таким образом, оценка суффозионной опасности производится посредством пространственного анализа 5 картографических моделей установленных факторов:

- суффозионности грунтов, построенной по результатам расчета показателя степени суффозионности;
- песчанистости грунтовой толщи перекрывающих отложений, определенной через отношение мощности всех песчаных слоев и прослоев к общей мощности перекрывающей толщи грунтов в рамках каждой отдельной скважины;
- мощности юрско-меловых глинистых грунтов;
- глубины залегания установившегося уровня грунтовых вод;
- напора трещинно-карстовых подземных вод.

Картографические модели строятся в программном продукте ArcGIS по точечным данным исследуемых показателей методом интерполяции между скважинами, расположенными по оси исследуемого объекта.

В качестве точечных данных выступают базы данных, созданные в результате экспертного анализа полевого и лабораторного материала.

Суффозионность грунтов

При прочих равных условиях суффозионность отложений зависит от соотношения диаметров пор и диаметров выносимых частиц (геометрический фактор), которые могут быть вынесены при определенном градиенте напора (гидродинамический фактор) [9].

Поровое пространство грунта может быть охарактеризовано коэффициентом пористости e , плотностью частиц грунта ρ_s , плотностью сухого грунта ρ_d , зависящего от плотности грунта ρ при естественной влажности w [10].

Анализ суффозионности грунтов производится по методике руководства П-55-76/ВНИИГ [11] по лабораторным данным исследования проб песчаных и супесчаных грунтов перекрывающей толщи.

Проверка суффозионности грунтов осуществляется исходя из условия:

$$d_{\max}^{ci} \leq d_3 \dots d_5,$$

где $d_3 \dots d_5$ – размер частиц грунта, определяемый по интегральной кривой гранулометрического состава при 3-5% обеспеченности (в настоящих расчетах принято значение обеспеченности 3%); d_{\max}^{ci} – максимальный размер частиц, выносимых

фильтрационным потоком из грунта, определяемый по зависимости:

$$d_{max}^{ci} = 0,77 d_{max}^0,$$

где d_{max}^0 – максимальный размер пор в грунте, определяемый по формуле М.П. Павчича:

$$d_{max}^0 = 0,455 \cdot (1 + 0,05K) \cdot \sqrt[3]{K} \cdot e \cdot d_{17},$$

где e – коэффициент пористости грунта, д.е.; d_{17} – размер частиц грунта, определяемый по интегральной кривой гранулометрического состава при 17% обеспеченности; K – параметр, определяемый по формуле:

$$K = \frac{d_{60}}{d_{10}}.$$

Если условие суффозионности удовлетворяется, то грунт считается суффозионным [4].

Для количественной оценки интенсивности суффозионной опасности введен параметр степени суффозионности λ_c , который определяется как разность между размером частиц грунта, определяемым по интегральной кривой гранулометрического состава при 3-5% обеспеченности (в настоящих расчетах принято значение обеспеченности 3%), и максимальным размером частиц, выносимых фильтрационным потоком из грунта, в зависимости от максимального размера пор в грунте.

По значениям показателя λ_c предлагается следующая классификация суффозионной устойчивости грунтов, приведенная в табл. 1.

Проведенный картографический анализ суффозионности грунтов позволяет сказать, что около 50% исследуемой территории фрагментарно покрыто слабосуффозионными грунтами, на остальной части территории развиты несуффозионные грунты (рис. 1). Следует отметить, что непосредственный расчет суффозионной устойчивости по отдельным пробам выявил среднесуффозионные грунты, ограниченно распространенные по площади и в разрезе. Однако при построении картографической модели производится осреднение данных по скважине, следовательно, на модели

участки развития среднесуффозионных грунтов не отражены.

Песчанистость покровной толщи

Немаловажная роль в интегральной оценке территории по отношению к суффозионной опасности отводится литологическому строению перекрывающих отложений. Одним из необходимых условий суффозионного процесса является наличие в геологическом разрезе суффозионно-неустойчивых грунтов.

Песчанистость толщи, или, иными словами, относительная мощность песчаных грунтов в толще перекрывающих отложений, определяется по данным инженерно-геологического и карстологического бурения скважин как отношение мощности песков к мощности перекрывающей толщи в целом, в процентном выражении (рис. 2).

Мощность перекрывающих коренных глин

Процесс суффозионного выноса песчаного материала в карстовые полости зависит от наличия мощного глинистого водоупора, перекрывающего толщу карстующихся пород и препятствующего вертикальному фильтрационному потоку подземных вод. На исследуемой территории таким водоупором служат глины юрского и каменноугольного возраста. Одиночными скважинами карстующиеся отложения вскрыты на значительных глубинах под относительно мощной толщей коренных глин, достигающей 30,0 м, однако, в целом, исследуемый участок характеризуется маломощным (0,2-10,0 м) глинистым водоупором (рис. 3).

Кроме того, результаты инженерно-геологического бурения, проведенного с весьма небольшим шагом по трассе, свидетельствуют о наличии гидрогеологических окон, участков, на которых возможен непосредственный переток пресных грунтовых вод в нижележащий горизонт трещинно-карстовых вод вследствие отсутствия глинистого водоупора между толщей песков и толщей карстующихся пород.

Таблица 1

Классификация суффозионной устойчивости грунтов по методике руководства П-55-77/ВНИИГ

| Наименование грунтов по степени суффозионности | Значения показателя λ_c |
|--|---------------------------------|
| Несуффозионные | < 0 |
| Слабосуффозионные | 0 – 0,1 |
| Среднесуффозионные | 0,1 – 0,2 |
| Сильносуффозионные | > 0,2 |

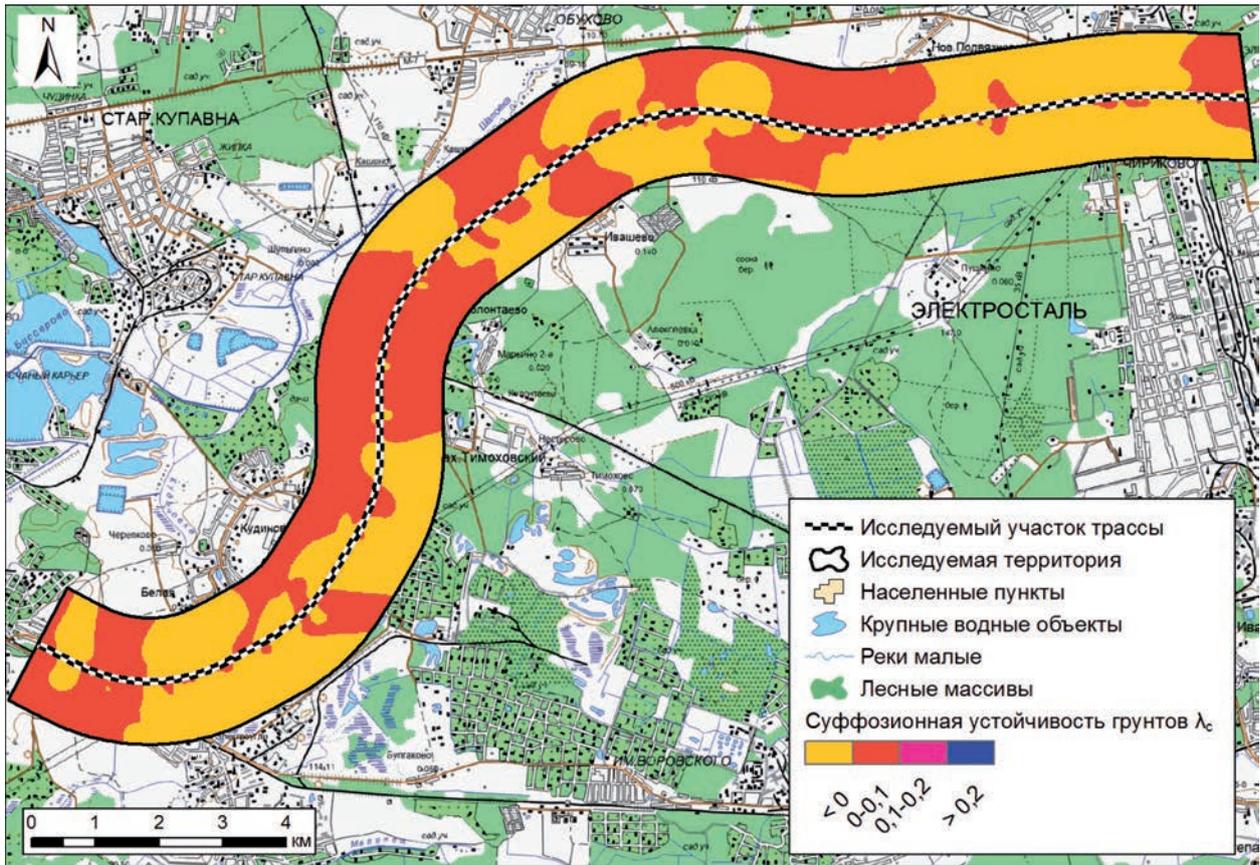


Рис. 1. Суффозионная устойчивость грунтов по значениям показателя λ_c (по методике руководства П-55-77/ВНИИГ)

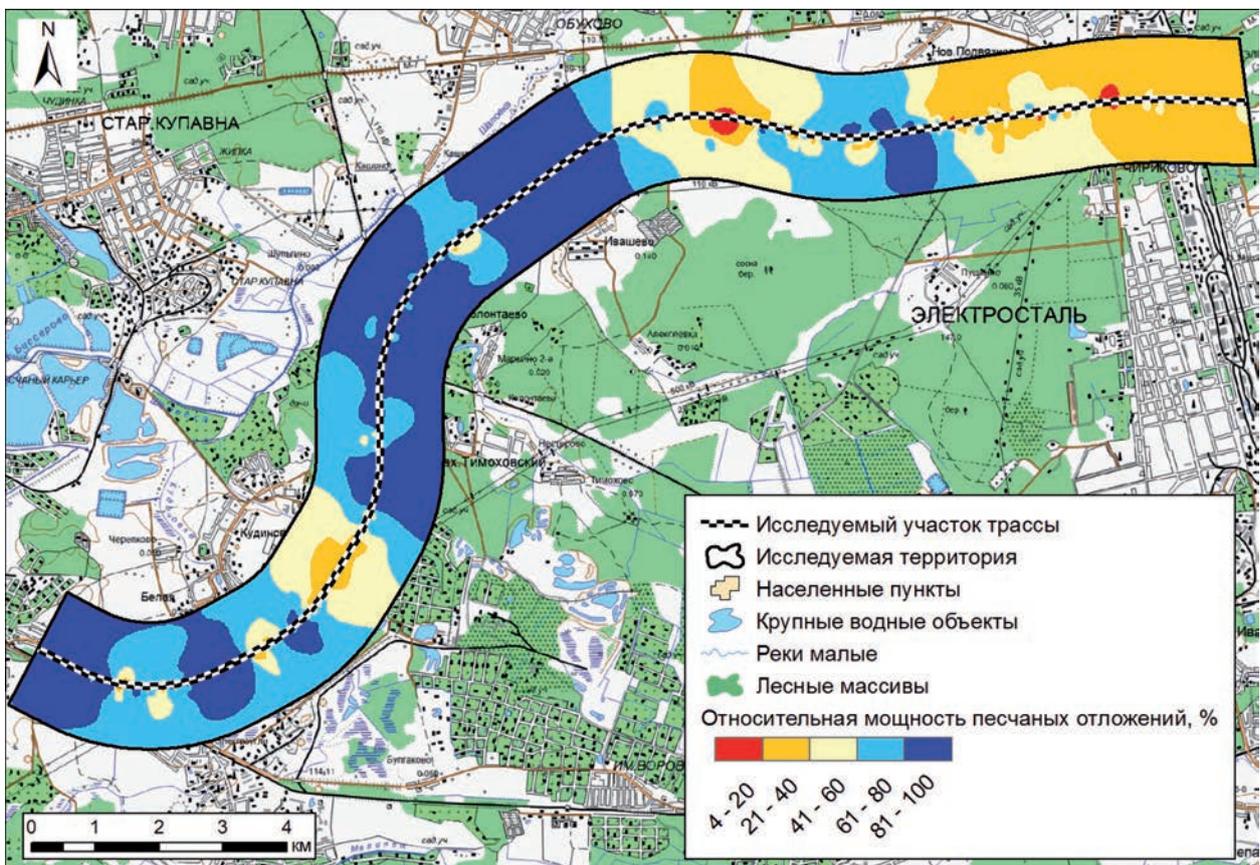


Рис. 2. Относительная мощность песчаных перекрывающих отложений

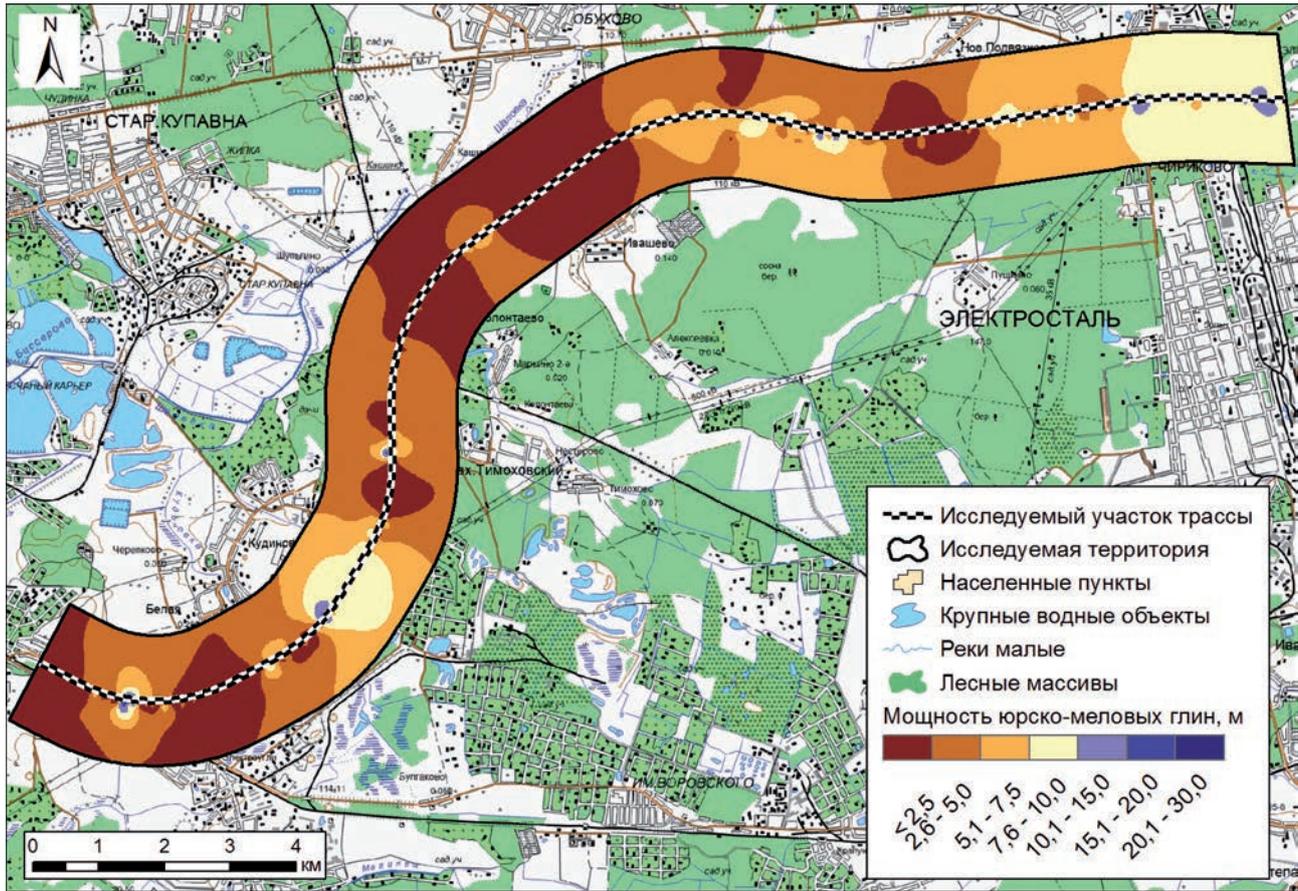


Рис. 3. Мощность юрско-меловых глин

Положение уровня грунтовых вод

Гидрогеологические условия в карстово-суффозионном массиве пород играют весьма важную роль. Наличие воды в порах песчаных грунтов, иными словами, положение толщи грунта ниже отметки уровня грунтовых вод (рис. 4), повышает вероятность суффозионного выноса дисперсного материала в карстовую полость, при прочих равных условиях. Одновременно низкое значение напора трещинно-карстовых вод также благоприятствует протеканию суффозионного процесса.

Для выхода на поверхность карстовой полости, сформированной в основании перекрывающей неводонасыщенной толщи, необходима серия вывалов внутри, все более вытянутых с уменьшением глубины параболоидных сводов полости. Количество вывалов прямо пропорционально мощности песчаной толщи. Внезапное формирование провальной формы на поверхности карстового массива, минуя серию последовательных вывалов неводонасыщенного песчаного грунта, возможно только при наличии разделяющего глинистого водоупора. Основная роль движущей силы в таких условиях отведена гравитационному сдвигению пород [12].

Однако в том случае, если карстующиеся отложения перекрыты водонасыщенными песками, кроме гравитационного процесса, в формировании провальной формы участвует и гидродинамический. При одинаковом размере карстовой полости и свободном выходе водного потока местоположение и форма формирующейся суффозионной полости в песчаном грунте определяются положением уровня грунтовых вод: чем выше уровень, тем выше формируется суффозионная полость. Кроме этого, для формирования суффозионной полости также необходимо относительно низкое положение пьезометрического уровня трещинно-карстовых вод, иными словами, карстовая полость-приемник должна быть частично или полностью обезвожена [12].

Напор трещинно-карстовых вод

В условиях нейтрального гидростатического давления вследствие всестороннего равномерного давления воды на частицы песчаного и супесчаного грунта деформации песчаного слоя не происходит, иными словами, суффозионный процесс не развивается [2], однако, если гидростатическое давление начнет снижаться, например, вследствие фильтрации через гидрогеологическое окно или в результате

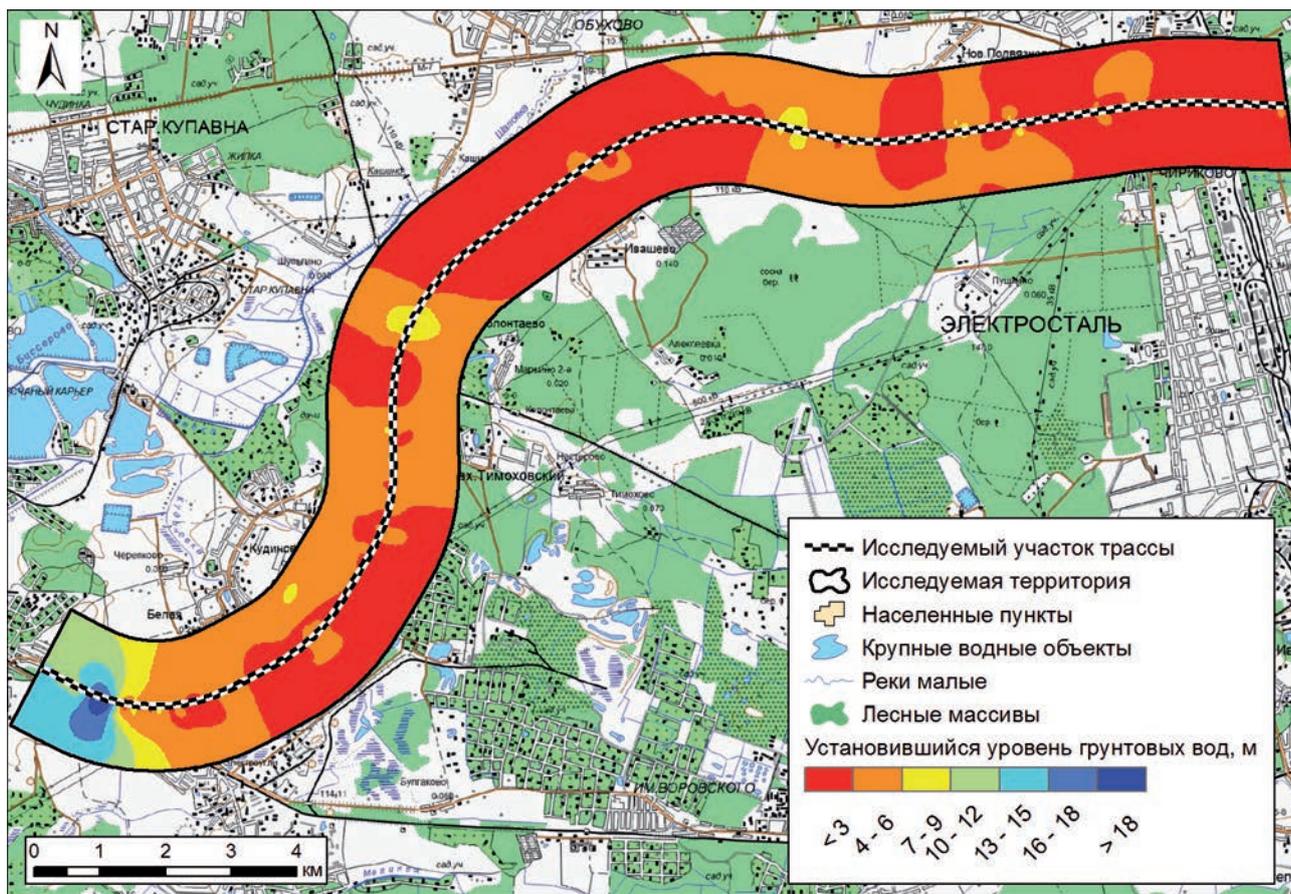


Рис. 4. Установившийся уровень грунтовых вод в различных генетических типах четвертичных отложений

откачек, возможен вынос суффозионно неустойчивых грунтов вследствие изменения гидродинамического градиента.

По мере роста гидравлического градиента нисходящего потока происходит сначала свободный вынос мелких фракций, а затем полное фильтрационное разрушение грунта. В результате фильтрационного разрушения потоком грунтовых вод порода теряет структурную прочность и начинает истекать в трещины [12].

Следовательно, чем выше положение уровня грунтовых вод и больше гидродинамический градиент, зависящий от пьезометрического уровня трещинно-карстовых вод (рис. 5), тем ближе к поверхности, при прочих равных условиях, находятся зоны суффозионного разрушения грунтов.

Интегральный анализ параметров, имеющих разную размерную величину, проводится балльным методом. Все растровые картографические модели приводятся к единой шкале значений посредством переклассификации. Другими словами, значения ячеек растра, соответствующие реальным единицам измерения исследуемых параметров, заменяются безразмерными величинами: каждая картографическая

модель методом равных интервалов переводится в балльную форму выражения. Таким образом, получаются новые картографические модели, характеризующиеся интервалами с изменчивостью баллов от 1 до 5, назначаемых по принципу увеличения балла по мере роста суффозионной опасности.

Ранжирование моделей производилось экспертным методом по принципу равных интервалов. Значения суффозионности грунтов, песчаности грунтовой толщи принимались прямо пропорциональными суффозионной опасности, то есть в анализе принято, что при увеличении значений перечисленных факторов опасность развития суффозионного процесса возрастает. Значения остальных показателей: мощности юрско-меловых глин, глубины залегания уровня грунтовых вод, напора трещинно-карстовых вод, напротив, обратно пропорциональными.

Пример растра исследуемого параметра, значения которого выражены в балльной форме, отражен на рис. 6.

В.Н. Дублянский и др. при оценке интенсивности развития карста балльным методом, основанной на ранжированных оценках факторов,

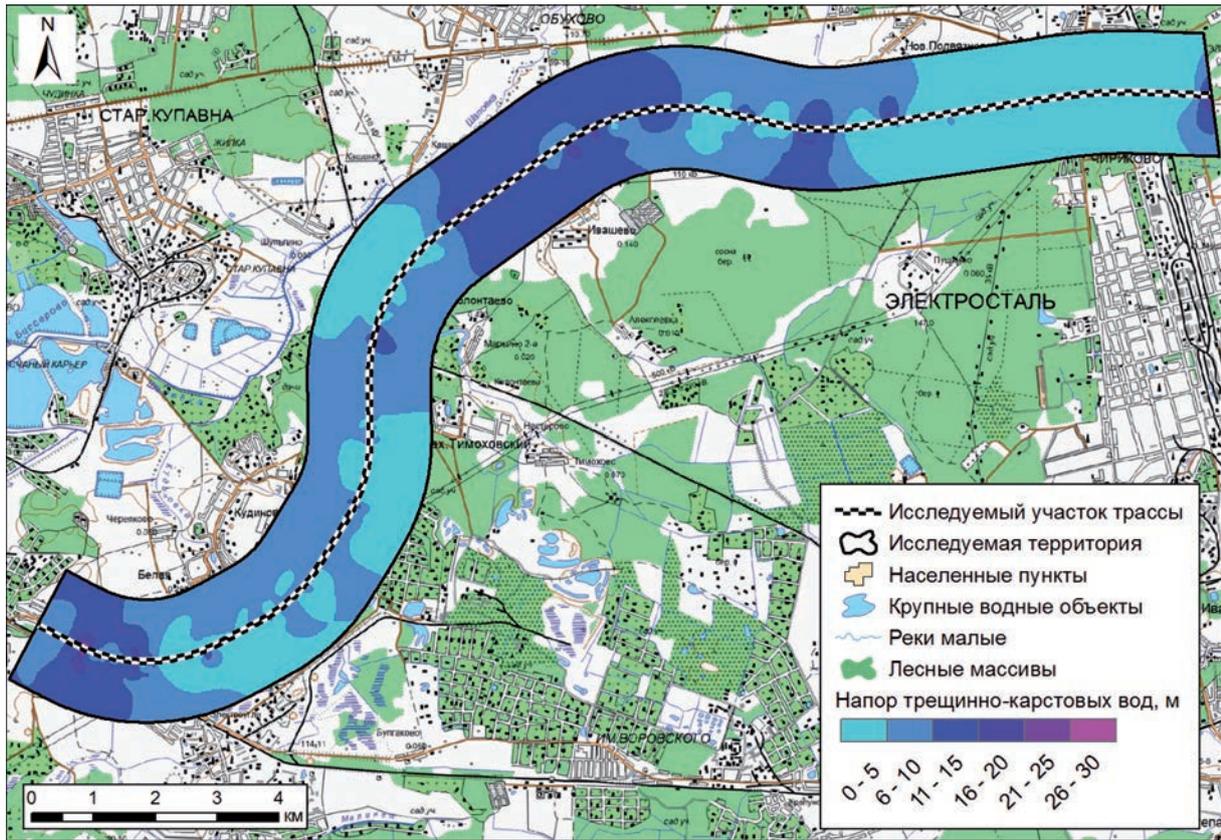


Рис. 5. Напор трещинно-карстовых вод

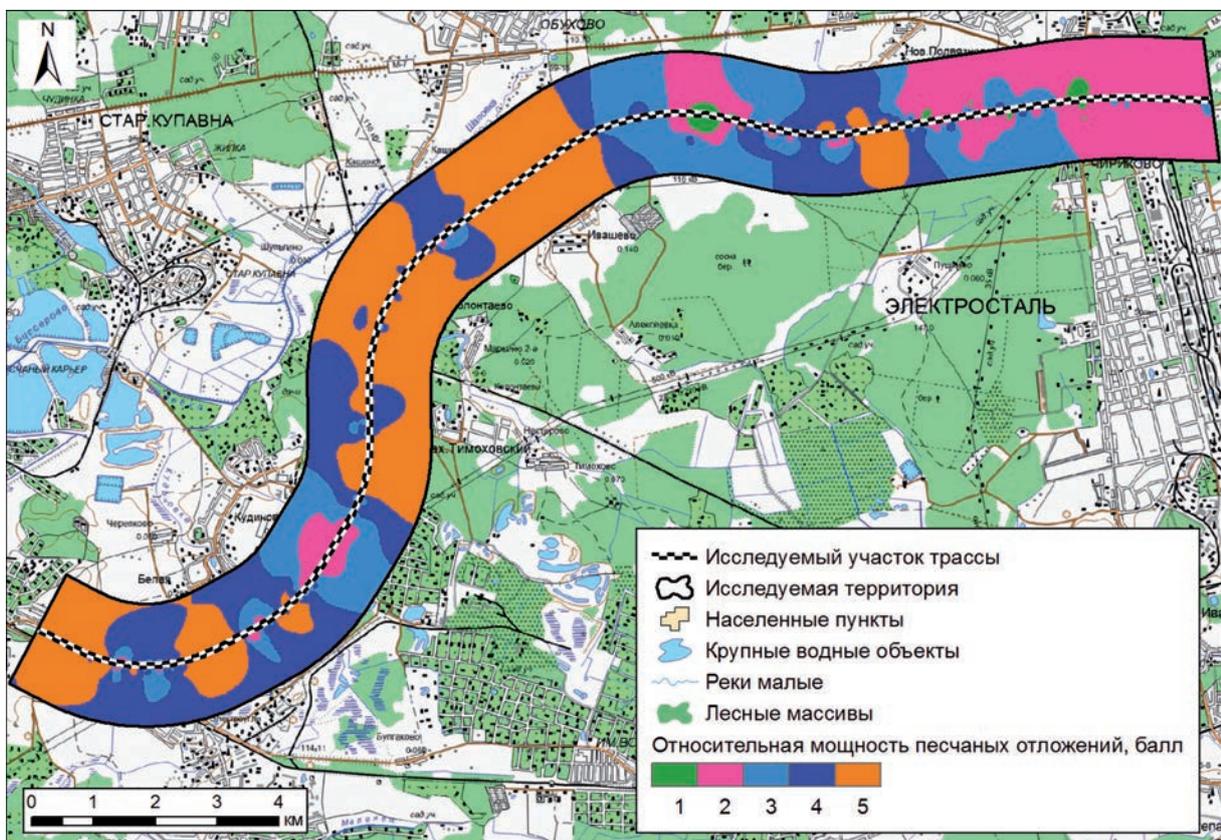


Рис. 6. Пример переклассифицированного растра относительной мощности песчаных перекрывающих отложений

составляющих четыре условия развития карста, отмечает субъективный или, точнее, эвристический характер использования этого метода. Повышению объективности балльного подхода способствует применение «взвешенных» баллов [5]. Поэтому суммирование картографических моделей производилось с учетом весового фактора. Вес показателей при расчете интегральной модели суффозионной опасности определен экспертным способом, исходя из теоретических представлений о роли исследуемых факторов в развитии суффозионного процесса:

- суффозионность грунтов – 0,25;
- напор трещинно-карстовых вод – 0,25;
- песчаность перекрывающей толщи – 0,2;
- появившийся уровень грунтовых вод – 0,15;
- суммарная мощность перекрывающих коренных глин – 0,15.

Результатом пространственного совмещения и суммирования баллов по каждой из 5 вышеприведенных картографических моделей, с учетом веса каждого показателя, является итоговая карта суффозионной опасности, включающая следующие степени опасности (рис. 7):

- слабоопасная – 2-3 балла;
- среднеопасная – 3-4 балла;
- опасная – более 4 баллов.

Верификация полученной интегральной модели суффозионной устойчивости территории производилась путем пространственного анализа данных о подземной и поверхностной закарстованности. Результат пространственного анализа выражен в статистическом распределении поверхностных карстовых и карстово-суффозионных и подземных карстовых форм по выделенным суффозионно опасным зонам, приведенным в табл. 2.

На исследуемой площади было зафиксировано порядка 200 поверхностных проявлений карстового и суффозионного процессов, представленных преимущественно древними карстовыми воронками и понижениями, а также относительно молодыми карстово-суффозионными воронками и оседаниями грунта. К карстовым воронкам отнесены образовавшиеся в результате обрушения свода карстовой полости формы, борта которых на данный момент выположены и находятся в устойчивом равновесном состоянии. Современных карстовых провалов на территории не зафиксировано.

Карстовые воронки большого диаметра, заполненные водой, выделены в отдельную категорию – озерные котловины, так как формирование конечного морфометрического облика образований является результатом постгенетического влияния абразионной деятельности водоемов.

Под карстовыми понижениями определены плавные деформации земной поверхности, происходящие без разрыва сплошности грунта.

К карстово-суффозионным отнесены молодые формирования, с незначительными по величине диаметрами и относительно малой глубиной. Кроме того, на развитие суффозионного процесса в парагенезисе с карстовым указывает незадернованный характер склонов воронок со следами осыпания и течения грунтов.

Так как приемником суффозионно выносимого материала могут являться даже очень тонкие трещины [12], целесообразно включить в пространственный анализ не только карстовые полости, но и зоны дробления в карстующихся породах.

Более наглядно данное распределение может быть отражено в графической форме (рис. 8). Следует заметить, что на графике приведены нормали-

Таблица 2

Плотность карстовых форм в пределах участков с различными категориями суффозионной опасности

| Категория суффозионной опасности | Площадь, км ² | Плотность карстовых форм, шт./км ² | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------|---|-------------|---------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| | | Подземная закарстованность | | | Поверхностная закарстованность | | | |
| | | Зоны дробления | Полости | | Карстового генезиса | | | Карстово-суффозионного |
| | | | заполненные | незаполненные | Понижения | Озерные котловины | Карстовые воронки | |
| 2-3 балла | 200,83 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,03 | 0,06 | 0,02 |
| 3-4 балла | 221,88 | 0,70 | 0,05 | 0,04 | 0,21 | 0,08 | 0,10 | 0,24 |
| 4-5 баллов | 17,38 | 14,90 | 1,44 | 0,75 | 1,67 | 0,12 | 0,23 | 4,26 |

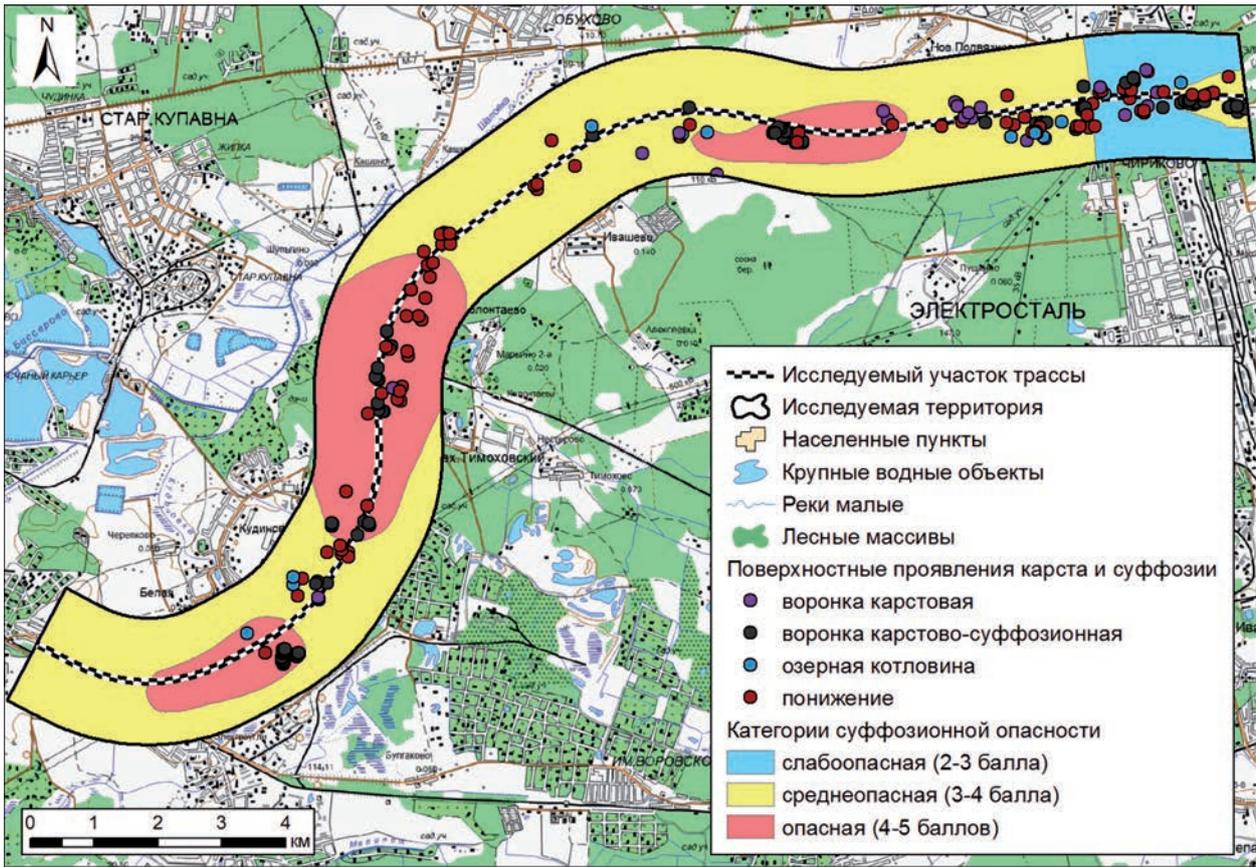


Рис. 7. Интегральная картографическая модель суффозионной опасности исследуемой территории

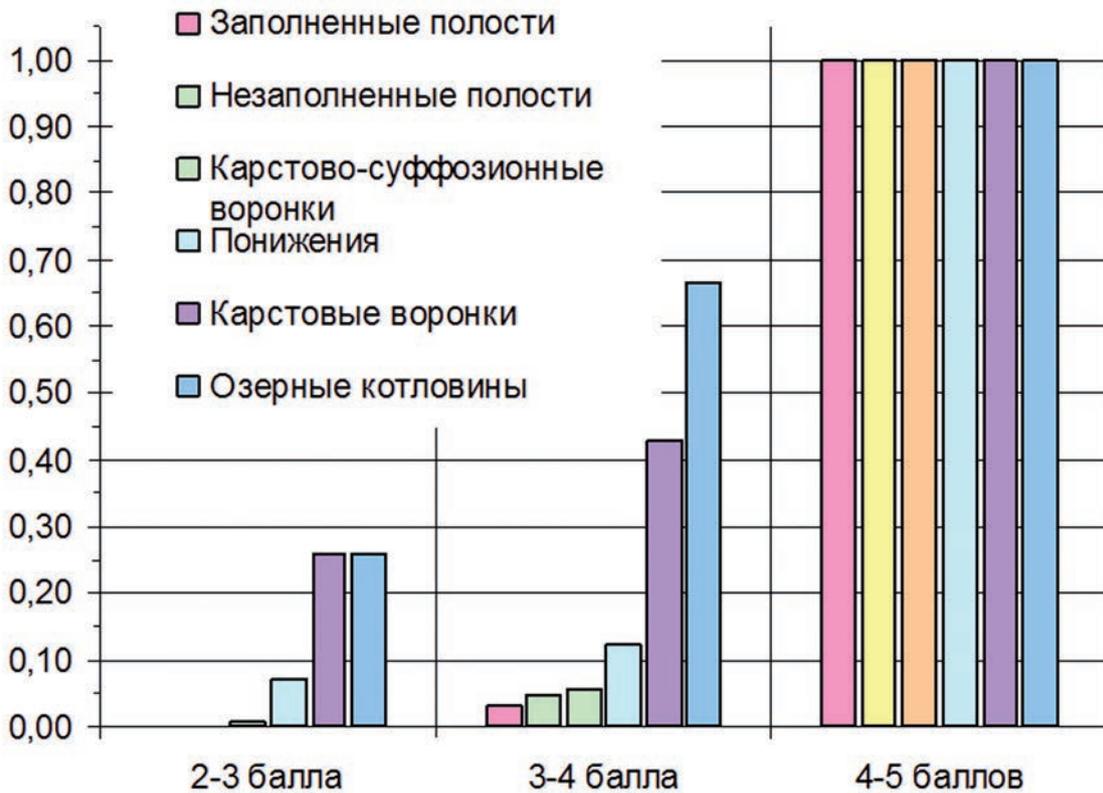


Рис. 8. Распределение нормализованных значений плотности карстовых и карстово-суффозионных поверхностных и карстовых подземных форм по суффозионноопасным зонам

зованные величины плотности карстовых форм, с целью уместить на одном графике ряды данных с различными диапазонами изменений значений выбранного показателя.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что плотность поверхностных карстовых форм увеличивается от территорий низкой слабоопасной категории к опасной. Наибольшая плотность подземных карстопроявлений, потенциальных приемников дисперсного материала, также отмечается в пределах участков, отнесенных к опасной категории.

Еще одним подтверждением объективного характера построенной интегральной картографической модели суффозионной опасности территории может служить тот факт, что большая часть зафиксированных на территории карстово-суффозионных форм также тяготеет к участкам опасной категории.

Построенная данным методом модель может использоваться при локальных исследованиях в целях районирования территории по степени суффозионной опасности. Набор факторов, используемых в анализе, можно считать универсальным для территорий, на которых возможно развитие суффозии в парагенезисе с карстом, эти факторы легко получить в количественном выражении в результате обработки данных полевых изысканий и лабораторного исследования грунтов. Введение дополнительных факторов в модель, являющихся специфическими для исследуемых территорий, повысит надежность модели. Кроме того, надежность модели можно повысить путем увеличения количества разведочных скважин, являющихся источником гидрогеологической и геологической информации.

Ключевые слова: суффозионная опасность, суффозионность грунтов, балльный метод, интегральная оценка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анিকেев А.В. Провалы и оседание земной поверхности в карстовых районах: моделирование и прогноз : автореф. дис. д-ра геол.-минер. наук. – М., 2014. – 47 с.

2. Архидьяконовских Ю.В. Моделирование процессов суффозии и гидроразрыва гидросферы : учеб. пособие по спецкурсу. – Пермь : ПГУ, 1983. – 88 с.

3. Вагнер Б.Б., Манучарянц Б.О. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона. – М. : Изд-во МГПУ, 2003. – 81 с.

4. Гидротехнические сооружения / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов и др. ; под общ. ред. В.П. Недриги. – М. : Стройиздат, 1983. – 543 с.

5. Дублянский В.Н., Клименко В.И., Михайлов А.Н. Ведущие факторы развития карста и балльная оценка его интенсивности // Инженерная геология. – 1990. – № 2. – С. 52-58.

6. Катаев В.Н. Основы структурного карстоведения : учеб. пособие по спецкурсу. – Пермь : ПГУ, 2004. – 143 с.

7. Катаев В.Н. Системный подход в анализе устойчивости карстовых массивов // Вестник Пермского университета. Геологи. – Пермь : ПГУ. – 1994. – Вып. 3. – С. 127-144.

8. Мулдер Э., Осипов В.И., Кутепов В.М., Толмачев В.В., Макаров В.И., Миронов О.К., Катаев В.Н., Еремина О.Н. К оценке опасности и риска на городских и промышленных закарстованных территориях на примере опорных участков в Москве и Дзержинске // Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение : мат-лы междунар. симпозиума (25-30 мая 2004, Пермь, Россия). – Пермь : ПГУ, 2004. – С. 29-36.

9. Печеркин А.И., Закоптелов В.Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ : учеб. пособие по спецкурсу. – Пермь : ПГУ, 1982. – 88 с.

10. Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость суффозионную устойчивость : П 49-90. – Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. – С. 94.

11. Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов : П 55-76. – Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1976. – С. 80.

12. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М. : Стройиздат, 1986. – 176 с.

13. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. – М. : ГЕОС, 2003. – 216 с.