

УДК 624.131.551

Оценка распространения грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, на примере участка в г. Москве

В.Б. Колошеин^b, Е.Р. Романова^{a, b, c *}, Р.Ю. Жидков^c, Ф.К. Буфеев^{a, d}

^a Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, ИГЭ РАН

101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2, а/я 145

^b Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет 129331, Москва, Ярославское шоссе, д. 26 (НИУ МГСУ)

^c Государственное бюджетное учреждение города Москвы «Московской городской трест геолого-геодезических и картографических работ», ГБУ «Мосгоргеотрест» 123040, Москва, Ленинградский пр-т, д. 11

^d Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23 МГРИ. Email: romanova.elizaveta.r@yandex.ru
(Статья поступила в редакцию 29.09.2025 г.)

Представлена методика оценки доли содержания в приповерхностной толще (до 50 м) грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, для которых, согласно нормативным требованиям (СП 446.1325800.2019), необходимо проведение дорогостоящих динамических испытаний. Методика апробирована на участке площадью 11,56 км² в г. Москве, в пределах которого выделены зоны динамического воздействия от транспорта (общей площадью 4,09 км²). Подход основан на комплексном анализе архивных данных инженерно-геологических скважин с последующей обработкой методами геостатистики и растровой алгебры. Для стратиграфо-генетических комплексов (СГК) рассчитывалась доля содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам (рыхлые и водонасыщенные пески, слабые глинистые грунты), после чего определялась средневзвешенная доля содержания в интервалах 10, 20, 30, 40, 50 м. Результаты показали, что доля содержания целевых грунтов не превышает 0,5. Установлено, что с увеличением глубины исследования (с 20 до 50 м) площадь зон динамической нагрузки с низкой долей содержания (<0,2) возрастает с 74 до 94,6 %, что связано с вовлечением в анализ более устойчивых дочетвертичных отложений. Разработанная методика позволяет на этапе планирования изысканий минимизировать риски дорогостоящих ошибок и может быть использована для создания карт динамической неустойчивости грунтов на всей территории Москвы, а также интегрирована в системы типа «Цифровой двойник».

Ключевые слова: динамическая неустойчивость грунтов, виброползучесть, вибропрочность, динамическая нагрузка, пространственный анализ.

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.4.328

Введение

Территория любого крупного города, такого как Москва, является источником множества динамических нагрузок. Геологическая среда испытывает сложное многокомпонентное вибрационное воздействие, формируемое совокупностью разнородных техногенных источников. Эти источники различаются своими физическими характеристиками, пространственным расположением и временем воздействия, создавая сложную

картину вибрационного поля в пределах города (Вихоть, Лютоев, 2020).

Подавляющее большинство оснований зданий и сооружений в Москве сложено дисперсными грунтами, которые под действием динамических нагрузок могут проявлять следующие типы реакции (Вознесенский, 2000):

– увеличение сжимаемости по сравнению со статическим режимом нагружения (виброкомпрессия);

© Колошеин В.Б., Романова Е.Р., Жидков Р.Ю., Буфеев Ф.К., 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

– накопление сдвиговых и объемных деформаций при длительных вибрационных нагрузках (виброползучесть);

– динамическое разжижение водонасыщенных грунтов.

Устойчивость дисперсных грунтов к вибрациям зависит как от характеристики динамической нагрузки, так и от свойств грунта – крупности частиц, плотности сложения, степени водонасыщения. Исследования (Борисов, Алимов, Усов и др., 2007; Кушнарера, 2008) показывают, что наибольшей устойчивостью к вибрационным воздействиям обладают крупнообломочные грунты, слабо увлажненные плотные крупные и средней крупности пески, твердые и полутвердые глины и суглинки. В то же время водонасыщенные и рыхлые мелкие и пылеватые пески, мягко- и текучепластичные глины и суглинки, супеси демонстрируют значительно меньшую сопротивляемость динамическим нагрузкам.

Учет, оценка и прогнозирование динамического воздействия на грунтовые массивы приобретают все большее значение в современной изыскательской практике. С одной стороны, наблюдается увеличение техногенных нагрузок в пределах города – расширение дорожной сети, строительство новых линий метрополитена, увеличение потока железнодорожного транспорта, забивка свай и т.д., ведущее к тому, что существующие основания зданий и сооружений испытывают дополнительную осадку, часто неравномерную (Борисов, Алимов, Усов и др., 2007; Костарев, 2004; Кофф, Минакова, Котлов и др., 1990). С другой стороны, строительство новых зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки приводит к более активному использованию подземного пространства города ввиду увеличения этажности (в том числе увеличению количества подземных этажей) и, как следствие, к увеличению заглубления фундамента. В сферу взаимодействия попадают ранее незадействованные грунтовые толщи, динамические свойства которых сильно варьируются.

Согласно п. 7.2.24.4 СП.446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ», при проектировании зданий и со-

оружений вблизи внешних источников динамических нагрузок от транспорта или промышленного оборудования, а также сооружений, являющихся при эксплуатации источниками динамических нагрузок, выполняют динамические испытания для определения характеристик виброползучести грунтов основания: песков рыхлых любой влажности, песков средней плотности водонасыщенных, связных грунтов с показателем консистенции выше 0,5. Ввиду проведения инженерно-геологических изысканий в г. Москве преимущественно в один этап, наиболее остро встает задача определения наличия грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, на этапе планирования.

Авторами в данном исследовании поставлена задача определить долю содержания грунтов, для которых необходимо определять характеристики виброползучести в пределах толщи 10, 20, 30, 40, 50 м (от земной поверхности) с учетом зон динамических нагрузок.

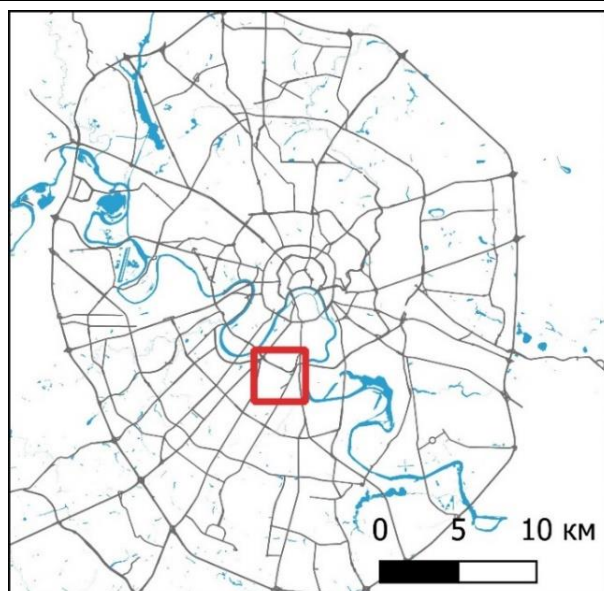
Характеристика объекта исследования

Для разработки и опробования методики расчета был выбран участок в пределах МКАД (Московской кольцевой автомобильной дороги) площадью 11,56 км² (квадрат размером 3,4×3,4 км). Участок располагается в Южном административном округе г. Москвы (рис. 1).

Данный участок был выбран ввиду широкого набора стратиграфических и литологических разностей массивов грунтов, пестроты геоморфологических элементов. Абсолютные отметки земной поверхности изменяются от 116 до 182 м.

Зоны динамических нагрузок. В данной работе зоны динамических нагрузок выделялись согласно пункту 7.2.24.4 (СП 446.1325800.2019):

- 100 м от края земельного полотна железной дороги;
- 50 м от осевой части трамвайной линии, линии метрополитена;
- 50 м от осевой части автомобильной дороги категории I (IA, IB, IB).



Условные обозначения
 граница области исследования

Рис. 1. Расположение области исследования.

На исследуемой области в западной части с юга на север проходит Павелецкое направление Московской железной дороги. Московское центральное кольцо (МЦК) с различными технологическими ответвлениями пересекает область с северо-запада на юго-восток. Трамвайная сеть имеет широкое распространение, включает в себя участки трамвайных маршрутов № 3, 14, 26, 38, 39, 47, 49 и пересекает охватываемую область в различных направлениях.

Область исследования пересекается Калужско-Рижской, Серпуховско-Тимирязевской и Троицкой (на завершающем этапе строительства) линиями Московского метрополитена. Калужско-Рижская линия пролегает в западной части участка с заглублением от 8 на юге до 45 м на севере области. Серпуховско-Тимирязевская линия проходит в восточной части участка, заглубление туннелей находится на участке 8–13 м. С запада на восток исследуемый участок пересекает Троицкая линия от станции «Академическая» в сторону станции «ЗИЛ», глубина заложения туннелей 20–30 м.

Автомобильная сеть широко развита в пределах исследуемой области, поскольку присутствуют как крупные автомагистрали – Третье Транспортное Кольцо (ТТК) на севере, Варшавское шоссе в западной части, так и дороги со значительно меньшей интенсив-

ностью движения и количеством полос, образующие однородную систему. По своему функциональному назначению и скорости движения автомобильные дороги на территории города нельзя отнести к I категории (за исключением МКАД). Однако исследования (Жигалин, Локшин, 1987, 1991) показывают, что величина динамического воздействия на геологическую среду и зона влияния зависят от интенсивности транспортного потока. Так, транспортный поток 8–10 тыс. ед./ч генерирует уровень вибрации 65–70 дБ (при скорости перемещения частиц грунта до 50–158 мкм/с). Помимо этого, вибрации от крупных автодорог, магистралей, эстакад в городе ощущаются и органами чувств человека даже на отдалении нескольких десятков метров от края дорожного полотна. Исходя из этого, в качестве очагов динамической нагрузки в области исследования выделены крупные магистрали (ТТК, Варшавское шоссе) зоной 50 м от края дороги, включая эстакады.

Площадь зоны динамической нагрузки составляет 4,09 км² (рис. 2). Авторы намерено не учитывали динамические нагрузки от промышленных зданий и сооружений ввиду их ограниченного распространения на территории города и относительно малого динамического воздействия на прилегающую геологическую среду.

Геологическое строение области исследования

В геологическом строении исследуемого участка на глубину до 50 м принимают участие отложения четвертичной, меловой, юрской и каменноугольной систем. Фрагмент карты, построенной на основе трехмерной геологической модели, и геологический разрез представлены на рис. 3, условные обозначения – на рис. 4. Для решения поставленной задачи при анализе геологической информации в пределах этой глубины были выделены стратиграфо-генетические комплексы (СГК) – полипородные геологические тела, сформировавшиеся в одно время под влиянием единого процесса седиментации (Бондарик, Ярг, 2018). Отложения четвертичной системы (Q_H) развиты повсеместно и представлены:

– современным звеном (Q_H) – техногенными, почвенно-растительными, озерно-болотными, аллювиальными и склоновыми отложениями;

– верхним звеном (Q_{III}) – аллювиальными, покровными, озерно-болотными отложениями;

– средним звеном (Q_{II}) – гляциофлювиальными, озерно-ледниковыми, ледниковыми отложениями.

Четвертичные отложения представлены шестнадцатью СГК, отложения представлены различными дисперсными грунтами – от крупных-гравелистых песков до тяжелых глин. Общая мощность четвертичных отложений достигает 44,5 м при средней 19 м. Ввиду большой неоднородности техногенных отложений они не учитывались в дальнейшей работе.

Меловая система (K), представлена одним СГК, являющимся нерасчлененными отложениями нижнего отдела, которые развиты преимущественно юго-западной половине участка. Абсолютные отметки кровли изменяются от 118 до 154,5 м. Отложения сложены мелкими и пылеватыми песками, мощность комплекса достигает 29 м при средней 7 м.

Юрская система (J) сложена четырьмя СГК. Отложения этой системы представлены волжским, оксфордским, келовейским ярусами и нерасчлененными отложениями батского и келовейского ярусов. Они распространены на всей территории участка и залегают под меловыми или непосредственно под четвертичными отложениями. Отложения системы представлены преимущественно глинами, в верхней части с выдержанными прослоями песков. Абсолютные отметки кровли изменяются от 104,5 до 133 м. Мощность отложений юрской системы достигает 56 м при средней 41 м.

Подстилают их каменноугольные отложения (C): на северной части участка распространены неверовская, ратмировская, воскресенская свиты верхнего отдела, на южной части – мячковские отложения среднего отдела. Отложения представлены твердыми глинами, известняками и мергелями. Абсолютные отметки кровли изменяются от 68 до 98 м. Данные отложения являются достаточно устойчивыми к динамическим нагрузкам,

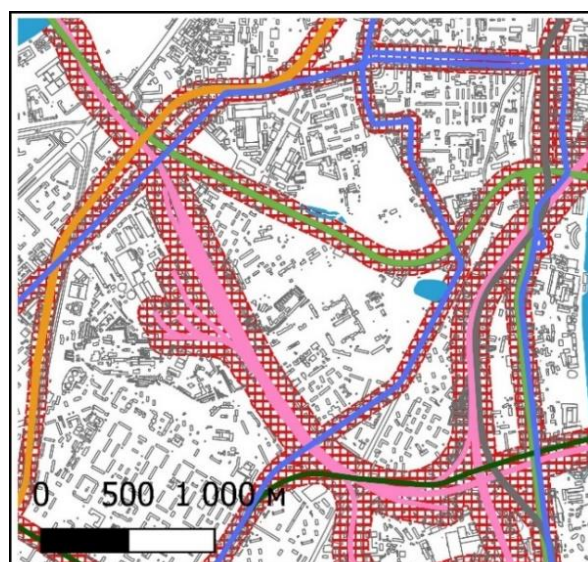
поэтому наличие стратиграфо-генетических комплексов каменноугольной системы принято за граничное условие при дальнейшем анализе.

Данные о мощности и обеспеченности выделенных СГК фактическим материалом на исследуемом участке приведены в табл. 1. Участки локального увеличения мощности техногенных грунтов связаны с наличием на участке засыпанных притоков р. Кровянки и убранных в коллектор участков р. Котловки.

Методика работы

Для решения поставленной задачи были осуществлены следующие действия:

1. В каждой скважине определена мощность каждого СГК и вычислена мощность грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам;




Условные обозначения

 зона динамической нагрузки

Источники динамических нагрузок:

Линии Московского метрополитена:

 Калужско-Рижская линия

 Серпуховско-Тимирязевская линия

 Троицкая линия

 трамвайные пути

 железнодорожные пути

 автодорожная сеть

Рис. 2. Зона динамической нагрузки

2. Для каждого СГК оценено изменение доли содержания искомых грунтов по площади (построены растры распределения долей содержания искомых грунтов с учетом распространения СГК);

3. Вычислены средневзвешенные доли содержания в толщах 10, 20, 30, 40, 50 м грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам (с использованием инструментов растровой алгебры).

Таблица 1. Мощность стратиграфо-генетических комплексов на участке исследования, площадь их распространения и обеспеченность фактическими данными

№ п /п	СГК	Максимальная мощность, м	Средняя мощность, м	Площадь распространения грунтов, км ²	Количество скважин, вскрывших СГК на полную мощность, шт
1	t H	31,1	3,3	11,56	1810
2	a H	15,7	6,6	0,65	133
3	l,pl H	2,6	0,5	0,03	8
4	da H	1,1	0,4	0,02	4
5	dl III-H	15,7	4,1	0,01	2
6	l,pl III-H	1,8	0,6	0,02	10
7	a 1 III mn-os	8,9	3,6	0,39	37
8	a ² III kl	13,75	1,21	2,23	272
9	a,f IIms	19,0	8,0	4,09	435
10	f,lg IIms	20,9	3,1	3,25	327
11	g IIms	11,6	3,5	2,33	263
12	f,lg Ids-IIms	16,8	4,1	5,43	356
13	g Ids	20,3	4,6	3,65	290
14	f Ist-ds	33,1	7,3	8,46	632
15	K ₁	29,4	11,8	6,71	222
16	J _{3v}	33,3	14,8	10,72	243
17	J _{3ox}	36,0	21,2	11,52	112
18	J _{2k}	14,2	4,9	9,70	75
19	J ₂ bt-k	19,6	4,2	5,22	30
20	e(C)	3,4	0,9	0,03	6
21	C _{3nvr}	4,9	1,2	0,17	4
22	C _{3rt}	6,0	3,1	0,64	11
23	C _{3vs}	14,2	5,9	7,51	23

В границах участка в базе данных геологических скважин ГБУ «Мосгоргеотрест» располагается 1890 скважин. Описание каждой скважины занесено в базу в соответствии с разработанной в учреждении методикой и классификатором. Исходными данными, используемыми для достижения поставленной задачи, является информация о литологическом составе, влажности и консистенции слоев. Благодаря этим данным можно узнать: глубину подошвы слоя, наименование грунта, показатель консистенции (для глин и суглинков), гранулометрический состав (для песков и крупнообломочных грунтов), плотность сложения (для песков) и влажность (также для песков). Эта информация является достаточной для выявления

грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам.

Авторами на основе базы данных были рассчитаны мощность каждого СГК в каждой скважине и суммарная мощность интересующих грунтов (только для СГК, вскрытых скважиной полностью).

Как грунты, чувствительные к динамическим нагрузкам, были выделены (согласно п. 7.2.24.4 СП. 446.1325800.2019):

1. пески рыхлые (любой влажности);
2. пески средней плотности водонасыщенные;
3. глины и суглинки мягкопластичные, текучепластичные и текучие;
4. супеси (с показателем консистенции 0,5 и выше).

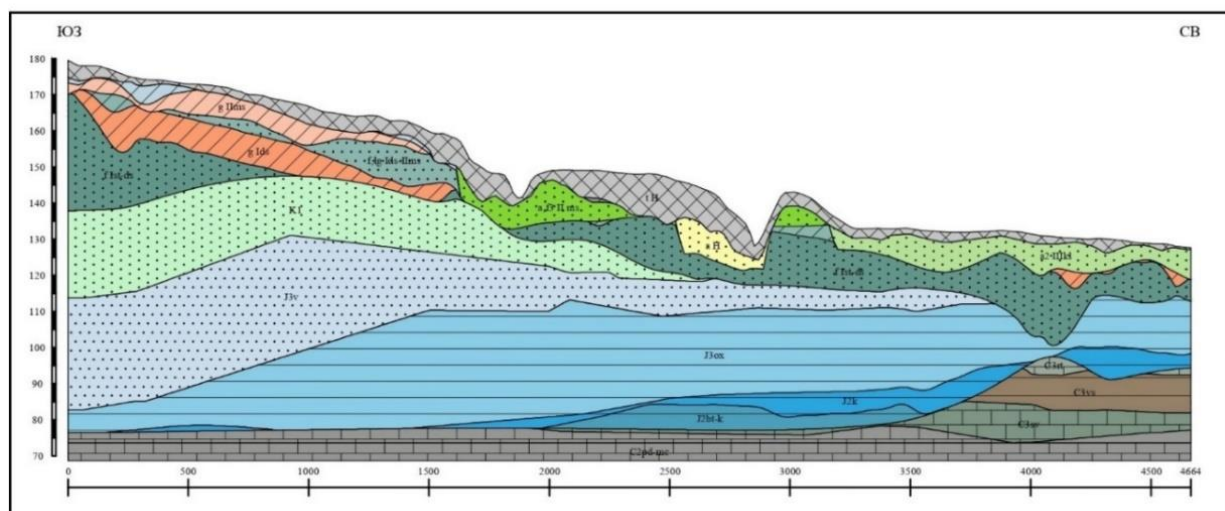
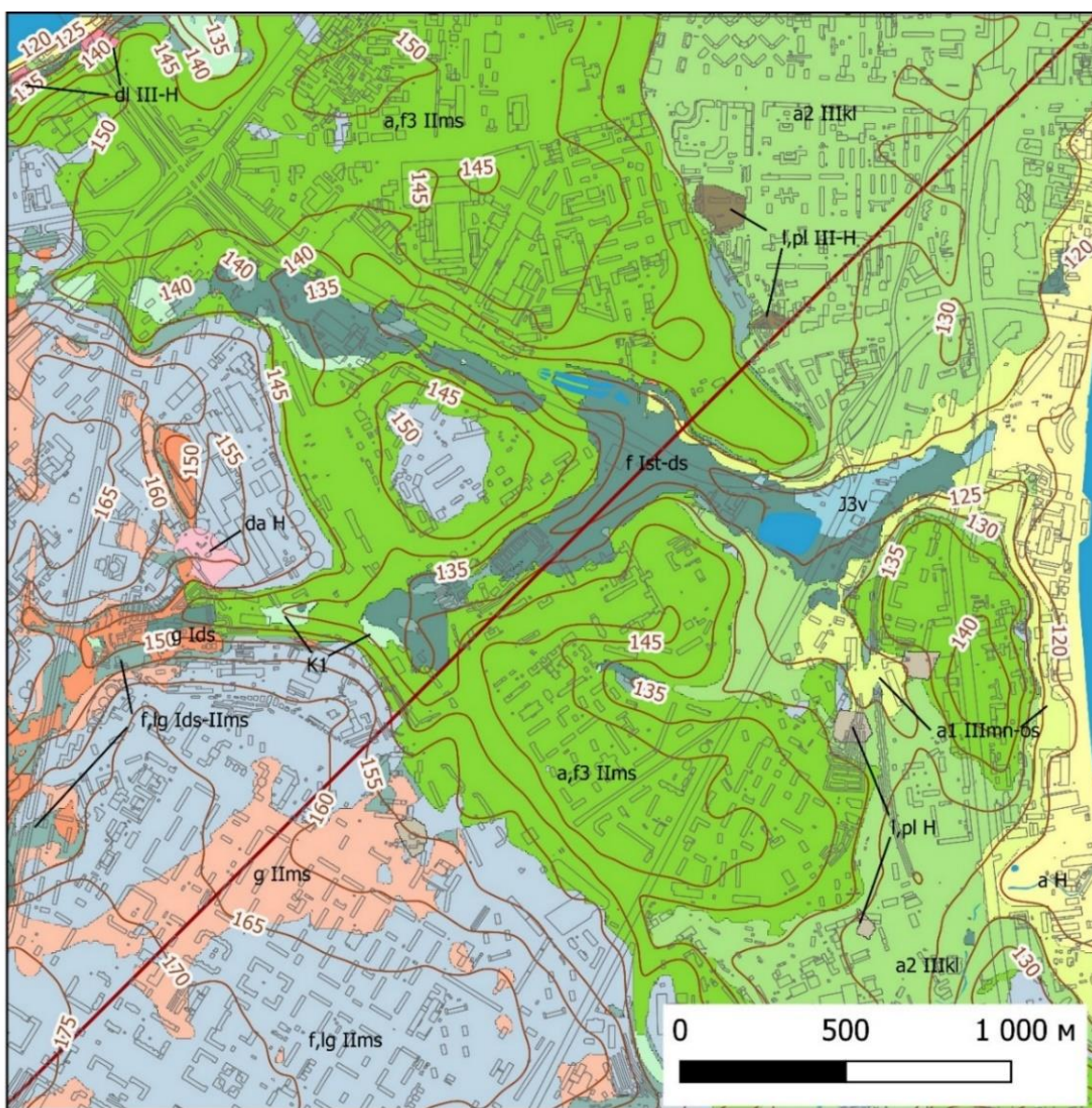
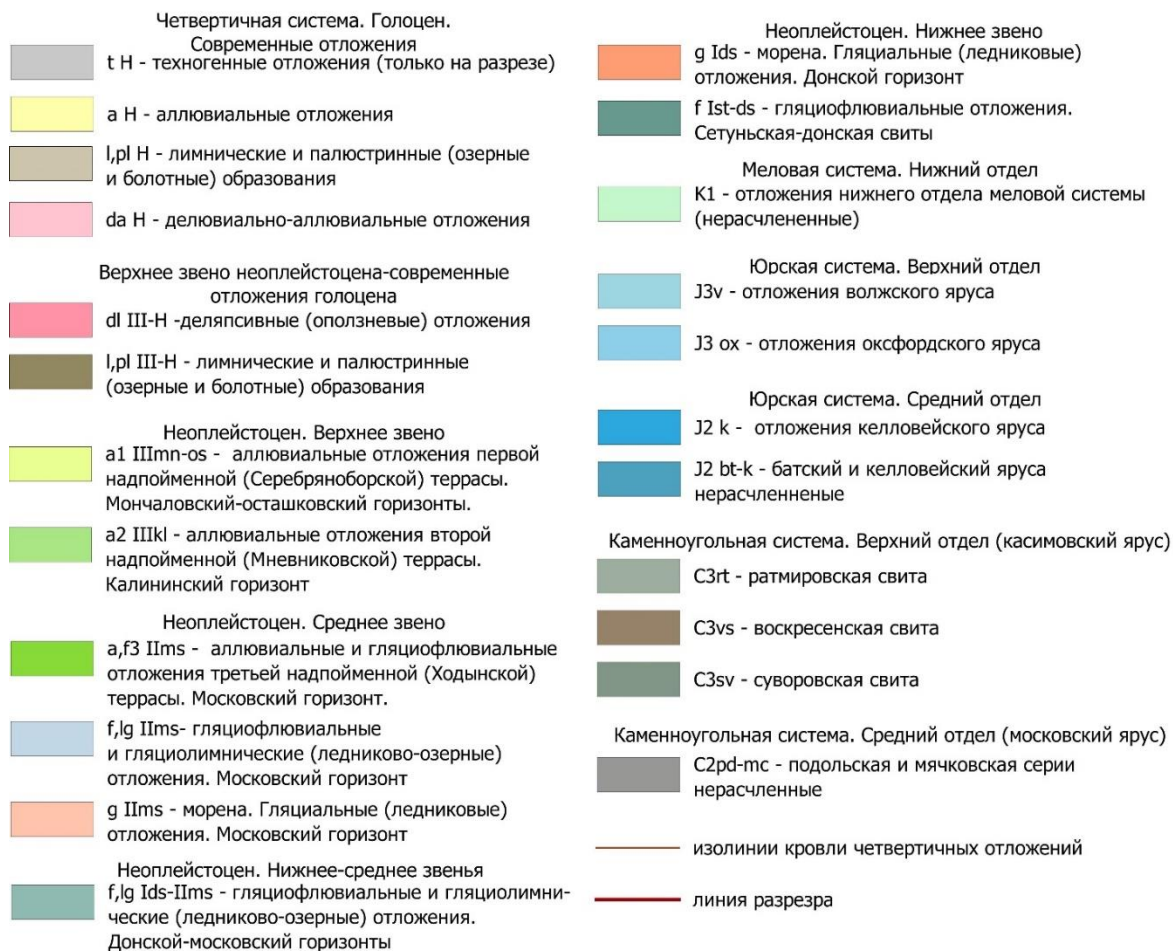


Рис. 3. Фрагмент карты, построенной на основе трехмерной геологической модели (а) и геологический разрез (б)

Условные обозначения к карте, построенной на основе трехмерной геологической модели



Условные обозначения к геологическому разрезу

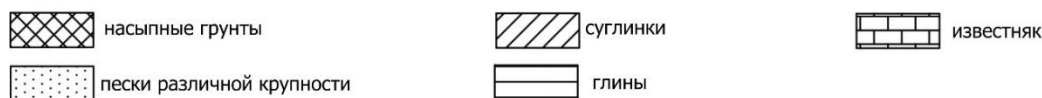


Рис. 4. Условные обозначения к фрагменту карты, построенной на основе трехмерной геологической модели (рис. 3а) и геологическому разрезу (рис. 3б)

Таким образом, авторы имеют точечные геоданные, которые содержат информацию о 7404 значениях мощности всех вскрытых на участке СГК с информацией о суммарной мощности грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам.

На следующем этапе необходимо для каждого СГК оценить изменение доли содержания искомым грунтов по площади, т.е. нужно точечную информацию преобразовать в пространственную. Решить эту задачу можно несколькими способами, авторы выбрали расчет методом скользящего окна.

Суть метода скользящего окна заключается в построении сетки полигонов с наложением,

после чего проводится вычисление необходимых параметров в границах каждого элемента сетки. Затем центру полигона (точке) присваивается значение искомым показателей, вычисленных для полигона. На завершающем этапе проводится построение раstra на основе регулярной сетки точек.

В данном исследовании сетка представляет собой круглые области площадью 1 км² (радиус такого круга составляет 564,189 м), центры элементов сетки располагаются с шагом 100 м по вертикали и 100 м по горизонтали, таким образом, в границах исследуемой области располагается 1156 кругов площадью 1 км².

В границах каждого из 1156 элементов сетки для каждого i -ого СГК вычисляется сумма мощностей грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, $\sum d_i$ (м), и сумма мощностей СГК $\sum h_i$ (м) на основе данных скважин, вошедших внутрь элемента сетки. После вычисляется доля содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, Pr_i (д.ед). Для каждого элемента сетки формула расчета доли содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, в i -ом СГК имеет вид:

$$Pr_i = \frac{\sum d_i}{\sum h_i}, \quad (1)$$

где d_i – суммарная мощность грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, относящихся к -ому СГК, м; h_i – суммарная мощность слоев грунтов относящихся к i -му СГК, м; i – номер СГК.

Рассмотрим пример. Площадь распространения аллювиальных отложений III (Ходынской) террасы в границах участка исследования составляет 4,00 км². На полную мощность данный СГК вскрыли 334 скважины (рис. 5а). Для большей наглядности расчеты методом скользящего окна будут показаны на примере 6 соседних элементов сетки. На рисунке 5б показаны центры элементов сетки с шагом 100 м по вертикали и горизонтали, представляющие собой круги площадью 1 км², также на рис. 5в показаны 6 элементов сеток, для которых будет продемонстрирован расчет. Для каждой скважины на прошлом этапе были вычислены мощность аллювиальных отложений III террасы и мощность интересующих грунтов. В границах каждого элемента сетки производится суммирование значений мощностей аллювиальных отложений III террасы и мощности интересующих грунтов для скважин, вошедших внутрь данного элемента сетки (одна скважина может попадать в несколько элементов сетки одновременно). Вычисляется доля содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, Pr_i по формуле (1). Затем центру каждого элемента сетки присваивается значение Pr_i . В результате авторы получают 1156 точек с шагом 100 м по вертикали и

горизонтали, которые несут в себе информацию о доли содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам в данном СГК (рис. 5г). Такая процедура была проведена для всех грунтов, выделенных на территории СГК. Затем строится растр изменения доли содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам (рис. 6).

Обычно при расчете методом скользящего окна в границах каждого элемента сетки вычисляется среднее арифметическое значение искомого показателя. Выбранный авторами подход был использован, чтобы учесть мощность искомым грунтов и мощность СГК.

Рассмотрим пример. Имеется 4 скважины, в которых СГК-1, для которого проводятся вычисления, имеет мощность 4,6,8 и 14 м. Примем, что мощность исследуемых грунтов в этих скважинах составляет 1, 2, 3, 8 м соответственно. При расчете среднего значения содержания искомым грунтов в этих скважинах результат будет иметь вид:

$$Pr_{1cp} = \frac{\frac{1}{4} + \frac{2}{6} + \frac{3}{8} + \frac{8}{14}}{4} = 0,38 \text{ д.ед.}$$

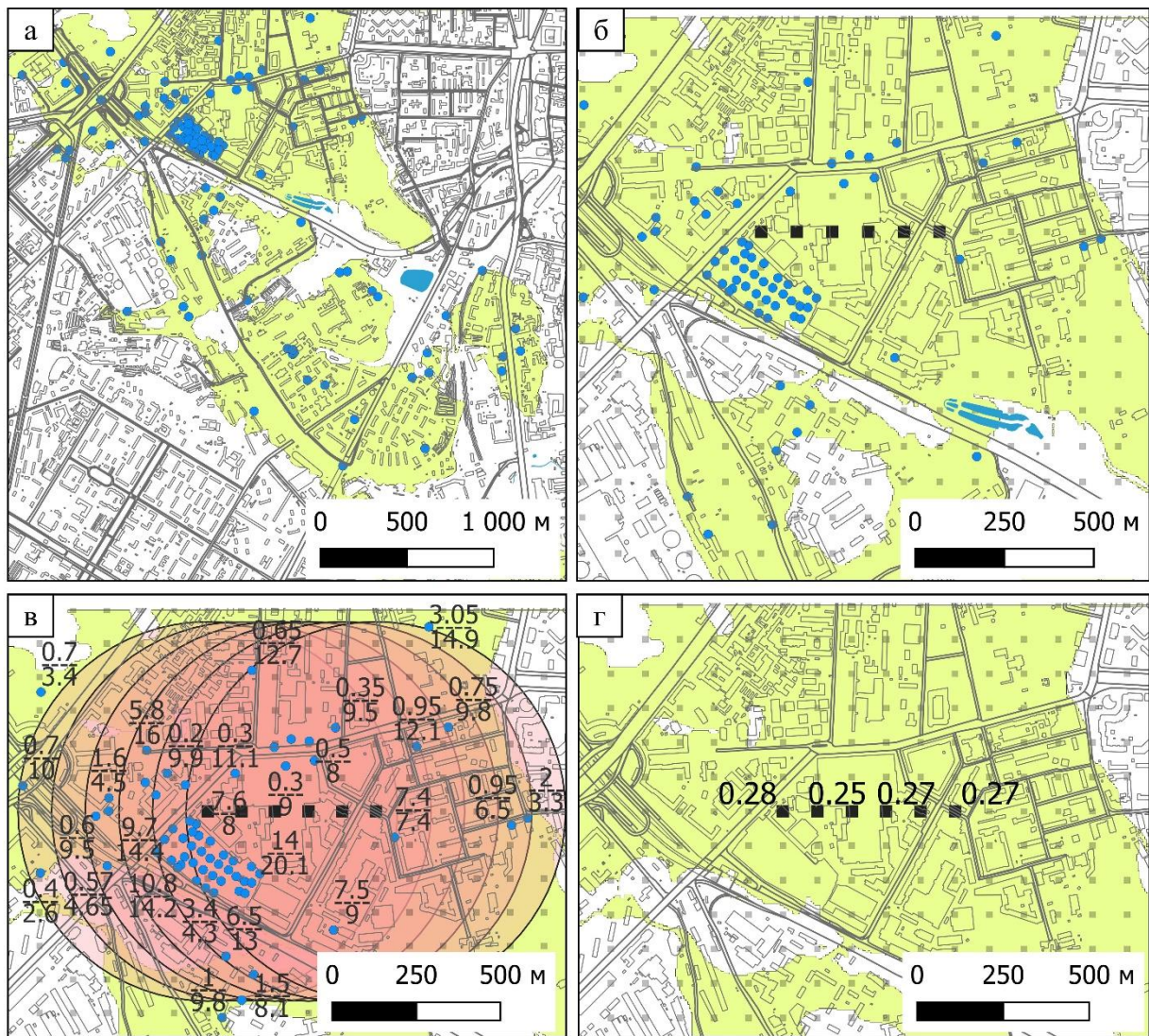
Для такого расчета не важны мощности СГК и искомым грунтов, ведь 1 м искомым грунтов при мощности СГК 1 м даст такую же долю содержания, как 20 м искомым грунтов при мощности СГК 20 м.

При расчете по формуле (1), предложенной авторами, Pr_h составит:

$$Pr_1 = \frac{1+2+3+8}{4+6+8+14} = 0,43 \text{ д.ед.}$$

Предложенный подход позволяет избежать повышенных значений доли содержания искомым грунтов в случае низкой мощности СГК.

Таким образом, авторы построили 18 растров, содержащих информацию о пространственном изменении доли содержания интересующих грунтов в каждом из СГК. Информация о минимальной, максимальной и средней доле содержания в СГК грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, представлена в табл. 2.



Условные обозначения

- область распространения аллювиальных и гляциофлювиальных отложений III (Ходынской) надпойменной террасы
- скважины, вскрывшие полностью аллювиальные и гляциофлювиальные отложения III (Ходынской) надпойменной террасы. В числителе мощность потенциально динамически неустойчивых грунтов в отложениях а, ф3 IIms; в знаменателе мощность отложений а, ф3 IIms
- 0,28 центры элементов сетки для которых продемонстрирован расчет, а также доля содержания интересующих грунтов в пределах элементов сетки
- центры элементов сетки
- элементы сетки

Рис. 5. Пример расчета методом скользящего окна

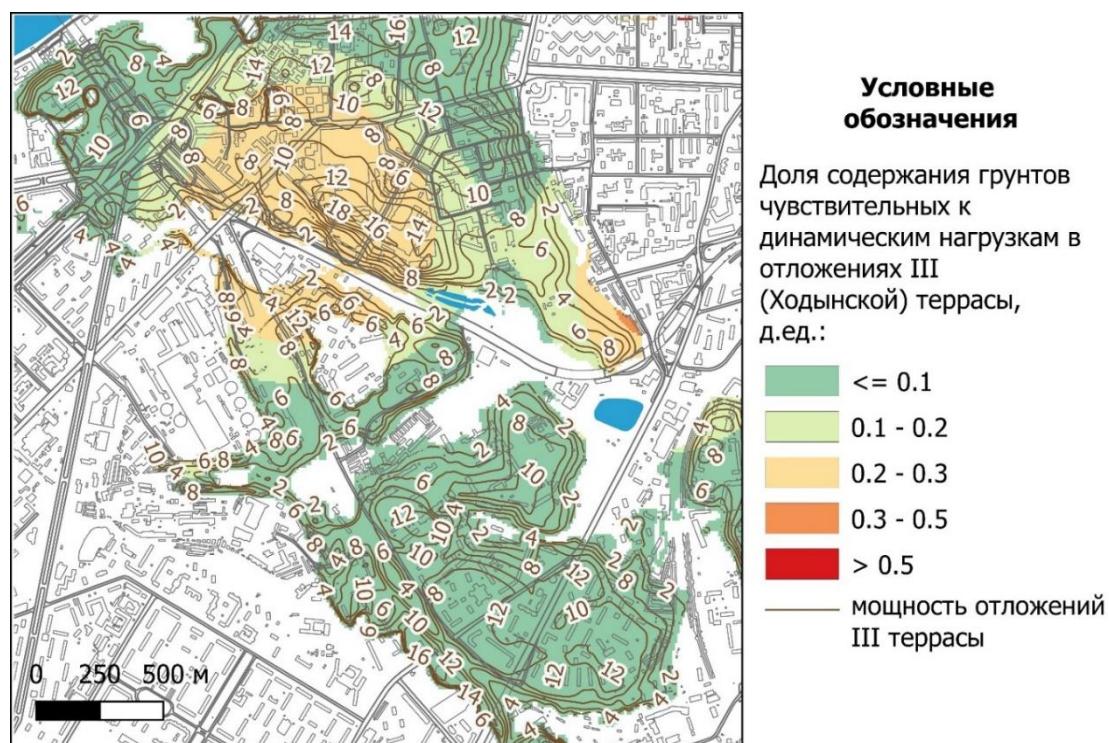


Рис. 6. Доля содержания в аллювиальных отложениях III (Ходынской) террасы грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам

Таблица 2. Доля содержания в SGK грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам

№ п/п	SGK	Доля содержания в SGK грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, (для всей исследуемой территории), д.ед.			Доля содержания в SGK грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, (для зоны динамической нагрузки), д.ед.		
		Минимальная	Максимальная	Средняя	Минимальная	Максимальная	Средняя
1	a H	0,10	0,40	0,30	0,10	0,39	0,26
2	l,pl H	0,00	0,95	0,62	0,63	0,95	0,86
3	da H	0,00	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00
4	dl III-H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	l,pl III-H	0,29	0,50	0,42	0,29	0,50	0,43
6	a l III mn-os	0,00	0,47	0,20	0,00	0,47	0,16
7	a ² III kl	0,06	0,58	0,25	0,08	0,58	0,23
8	a,f IIms	0,01	0,57	0,12	0,01	0,37	0,08
9	f,lg IIms	0,00	0,23	0,11	0,00	0,21	0,09
10	g IIms	0,00	0,10	0,02	0,00	0,10	0,02
11	f,lg Ids-IIms	0,00	0,48	0,13	0,00	0,37	0,14
12	g Ids	0,00	0,17	0,02	0,00	0,16	0,01
13	f Ist-ds	0,05	0,64	0,25	0,05	0,64	0,26
14	K ₁	0,00	0,99	0,19	0,00	0,99	0,17
15	J _{3v}	0,00	0,53	0,15	0,00	0,53	0,14
16	J _{3ox}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	J _{2k}	0,00	0,80	0,11	0,00	0,73	0,03
18	J _{2bt-k}	0,00	0,60	0,19	0,00	0,60	0,14

На заключительном этапе в каждой точке исследуемой территории была определена средневзвешенная доля содержания интересующих грунтов Pr_h для толщи 10, 20, 30, 40, 50 м.

Средневзвешенная доля содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, Pr_h вычисляется как отношение суммы произведений доли содержания интересующих грунтов и мощности СГК к мощности толщи, для которой проводится расчет:

$$Pr_h = \frac{Pr_1 \cdot m_1 + Pr_2 \cdot m_2 + \dots + Pr_n \cdot m_n}{\sum_j^m m} \quad (2)$$

где $\sum_j^m m = 10, 20, 30, 40$ или 50 м, Pr_1 ; m_1 – доля содержания интересующих грунтов в СГК-1 и мощность СГК-1 в данной точке.

Анализ полученных результатов

Расчет содержания интересующих грунтов в каждом СГК был выполнен для всей исследуемой территории. На рисунке 7 представлены карты доли содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, в толще 10, 20, 30, 40, 50 м для вибрационных зон. Для зон, не являющихся на данный момент областями распространения динамических нагрузок, доля содержания грунтов показана более светлой заливкой. В таблице 3 представлены результаты вычисления процента площади для различных интервалов доли содержания искомым грунтов от площади вибрационных зон. Так, для толщи 10 м процент участков с долей содержания таких грунтов менее 0,1 д.н. составляет 46,6 %, этот же показатель для толщи 30 м составляет 21,3 %.

При увеличении глубины анализа с 20 м и более доля содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, уменьшается. Это объясняется тем, что в область анализа захватываются преимущественно более устойчивые дочетвертичные отложения. В толщах 10 и 20 м наибольшая доля содержания данных грунтов на участке из-за распространения аллювиальных отложений второй (Мневниковской) террасы.

Используя полученные данные, можно оценить долю содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам. Как видно из полученных результатов, доля содержания на участке работ грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, на ограниченных территориях превышает 0,3–0,4 и преимущественно лежит в диапазоне от 0 до 0,2.

Таблица 3. Процент от площади динамической зоны в зависимости от доли содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, в толще 10, 20, 30, 40, 50 м

Глубина анализа, м	Процент от площади динамической зоны в зависимости от доли содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам				
	< 0,1 д.ед, %	0,1–0,2 д.ед, %	0,2–0,3 д.ед, %	0,3–0,4 д.ед, %	>0,4 д.ед, %
10	46,6	33,4	14,1	5,7	0,2
20	26,6	47,4	22,3	3,6	0,1
30	21,3	62,1	15,7	0,9	0,0
40	27,7	65,6	4,1	2,7	0,8
50	36,3	58,3	2,7	1,9	0,2

Заключение

В работе продемонстрирована возможность на основе фактических архивных данных построить карту доли содержания в приповерхностной части литосферы мощностью 10, 20, 30, 40, 50 м грунтов, при исследовании которых, согласно действующим нормативам, необходимо проводить специализированные динамические испытания. Такие испытания достаточно дорогостоящие, поэтому вопрос определения наличия указанных грунтов имеет прикладное и экономическое значение при планировании работ.

В дальнейшем авторы планируют использовать вышеописанную методику для картирования доли содержания в приповерхностной толще грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, на территории всей Москвы. Такие карты могут стать для изыскателей полезным источником информации, который позволит минимизировать вероятность дорогостоящих ошибок при составлении программы работ.

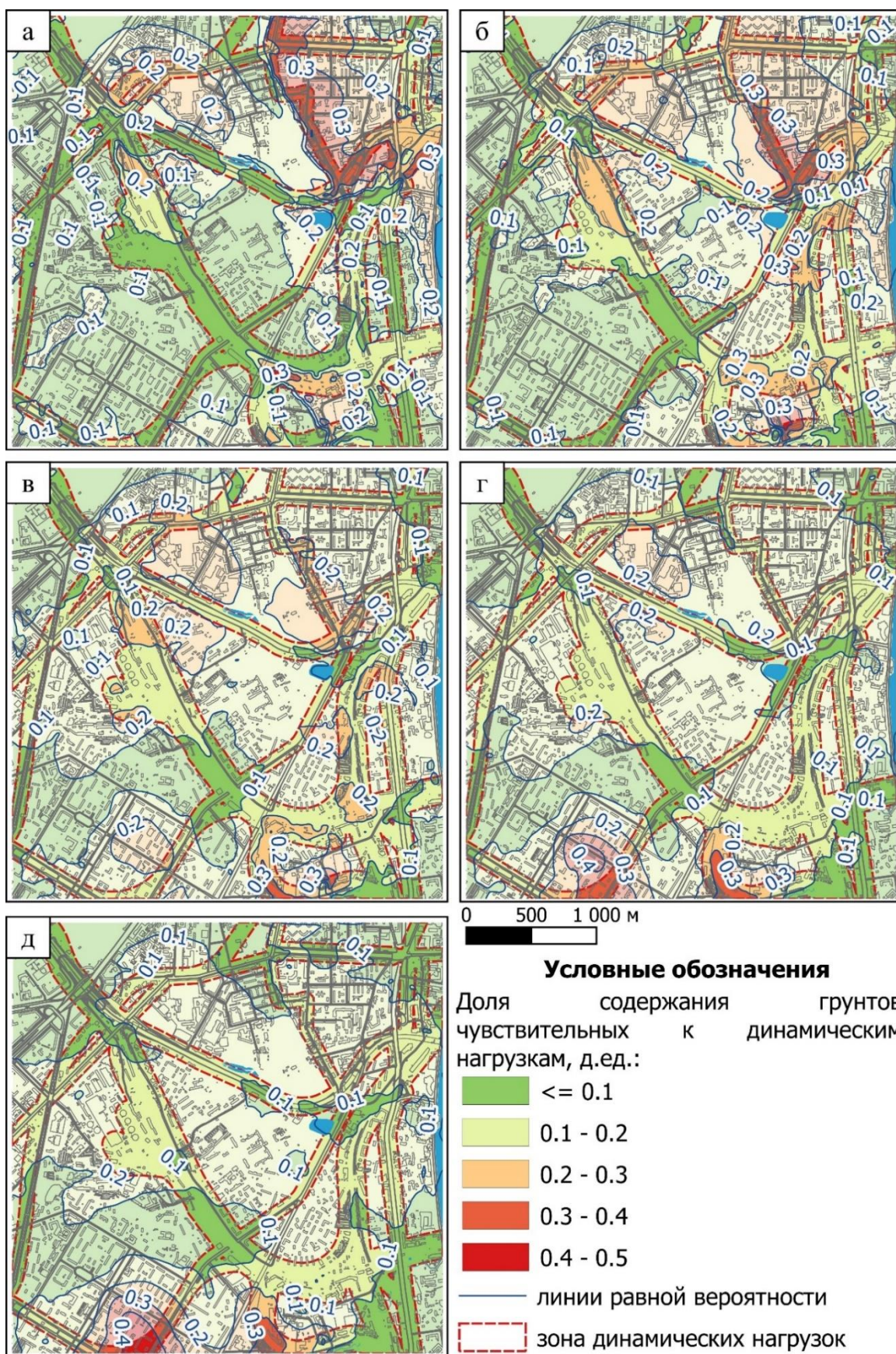


Рис. 7. Доля содержания грунтов, чувствительных к динамическим нагрузкам, в толще 10 (а), 20 (б), 30 (в), 40 (г), 50 м (д)

Также разработанная методика позволяет использовать и воспроизводить полученные результаты в моделях и системах типа «Цифровой двойник». Интеграция результатов в такую систему даст возможность в интерактивном формате визуализировать их, основываясь на зоне влияния конкретного сооружения.

Зона динамической нагрузки города непостоянна, со временем часть источников исчезает, однако для Москвы характерно, скорее, увеличение таких источников, поэтому необходимо проводить подобное исследование для всей территории. Также авторы планируют выполнить валидацию результатов на основе данных, которые не были занесены с базы данных ГБУ «Мосгоргеотрест».

Библиографический список

Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Инженерно-геологические изыскания: учебное пособие, электронное издание сетевого распространения. М.: «КДУ», 2014. С. 424.

Борисов Е.К., Алимов С.Г., Усов А.Г. и др. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации. Петропав-

ловск-Камчатский, 2007. 128 с. ISBN: 978-5-328-00160-1 EDN: QNNCCX

Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов: дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 04.00.07. М., 2000. 368 с. EDN: QDCFTT

Вихоть А.Н., Лютов В.А. Анализ параметров вибрационного поля города корреляционно-регрессионным методом // Вестник Пермского Университета. Геология. 2021. № 1. С. 49–55. DOI: 10.17072/psu.geol.20.1.49 EDN: ENQFSC

Жигалин А.Д., Локишин Г.П. Техногенное вибрационное воздействие на геологическую среду // Инженерная геология. 1987. № 3. С. 86–92.

Жигалин А.Д., Локишин Г.П. Формирование вибрационного поля в геологической среде // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 110–119.

Костарев С.А. Анализ вибраций, генерируемых линиями метрополитена, и разработка комплекса мероприятий по их снижению: автореф. ... д-ра тех. наук: 01.02.06. Нижний Новгород, 2008. 40 с.

Кушнарева Е.С. Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии: автореф. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.08. М., 2008. 25 с.

СП.446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

Assessment of the Distribution of Soils Sensitive to Dynamic Loads: a Case Study of a Site in Moscow

V.B. Koloshein^b, E.R. Romanova^{a,b,c,*}, R.Yu. Zhidkov^c, F.K. Bufeev^{a,d}

^a Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Science, 13 Ulanskiy Lane, 2 Bldg., Moscow 101000, Russia

^b Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, 26 Yaroslavskoye Road, Moscow 129337, Russia

^c State Budgetary Institution Mosgorgeotrest, 11 Leningradskiy Ave, Moscow 123040, Russia

^d Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting 23 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117997, Russia

* Email: romanova.elizaveta.r@yandex.ru

This article presents a methodology for assessing the portion of soils sensitive to dynamic loads within the near-surface (to a depth of 50 meters). According to regulatory requirements these soils necessitate costly dynamic testing. The methodology was tested on an 11.56 km² site in Moscow, within which the zones of dynamic impact from transportation (with a total area of 4.09 km²) were identified. The approach is based on a comprehensive analysis of archival data from engineering-geological boreholes, followed by geostatistic and raster algebra processing. For each stratigraphic-genetic complex (SGC), presented by a group of deposits of similar age and origin, the proportion of soils sensitive to dynamic loads (loose and water-saturated sands, weak clayey soils) was calculated. Subsequently, a weighted average proportion of content was determined for the intervals of 10, 20, 30, 40, and 50 meters. The results showed that the proportion of the target soils does not exceed 0.5. It was established that as the investigation depth increases (from 20 to 50 meters), the area of dynamic impact zones with a low proportion of content (<0.2) increases from 74% to 94.6%. This is attributed to the inclusion of more stable pre-Quaternary deposits in the analysis. The developed methodology allows for minimizing the risks of costly errors during the planning stage of site characterization. It can be used to create maps of soil dynamic instability across the entire territory of Moscow and can be integrated into systems such as a "Digital Twin."

Key words: *dynamic instability of soils; vibrocreep; cyclic strength; dynamic loading; spatial analysis*

References

- Bondarik G.K., Yarg L.A.* 2014. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya [Engineering-Geological Surveys]. Moscow. KDU (in Russian) URL: <https://bookonlime.ru/node/563/>
- Borisov E.K., Alimov S.G., Usov A.G., et al.* 2007. Eksperimentalnaya dinamika sooruzheniy. Monitoring transportnoy vibratsii [Experimental Dynamics of Structures. Monitoring of Transport Vibration]. Petropavlovsk-Kamchatsky, KamchatGTU, p. 128 (in Russian)
- Voznesensky E.A.* 2000. Dinamicheskaya neustoychivost gruntov [Dynamic Instability of Soils]. Diss. Dr. of Sci. Moscow (in Russian)
- Vikhot A.N., Lyutoev V.A.* 2021. Analiz parametrov vibratsionnogo polya goroda korrelyatsionno-regressionnym metodom [Analysis of Vibration Field Parameters of the City by the Correlation-Regression Method]. Vestnik Permskogo Universiteta. Geologiya. 20(1):49–55 (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.20.1.49
- Zhigalin A.D., Lokshin G.P.* 1987. Tekhnogenoe vibratsionnoe vozdeystvie na geologicheskuyu sredu [The technogeneous vibration impact on the geological environment]. Inzhenernaya Geologiya. 3:86–92 (in Russian)
- Zhigalin A.D., Lokshin G.P.* 1991. Formirovanie vibratsionnogo polya v geologicheskoy srede [Development of the vibration field in geological environment]. Inzhenernaya Geologiya. 6:110–119 (in Russian)
- Kostarev S.A.* 2008. Analiz vibratsiy, generiruemyykh liniyami metropolitena, i razrabotka kompleksa meropriyatiy po ikh snizheniyu [Analysis of vibrations generated by metro lines and development of a complex of measures for their reduction]. Diss. Dr. Sci. Nizhniy Novgorod (in Russian)
- Kushnareva E.S.* 2008. Ustoychivost vodonasyshchennykh peskov pri dinamicheskom vozdeystvii [Stability of water-saturated sands under dynamic load]. Diss. Cand. Sci. Moscow (in Russian)
- SP 446.1325800.2019.* Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva. Obshchie pravila proizvodstva rabot [Code of Rules 446.1325800.2019. Engineering-Geological Surveys for Construction. General Regulations for Work Production]. 2019 (in Russian)