

УДК 550.34.016

МОНИТОРИНГ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОЛИМПИЙСКИХ СООРУЖЕНИЙ (г. СОЧИ, ИМЕРЕТИНСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ)

© 2022 г. Б. А. Трифонов^{1,*}, С. Ю. Милановский^{1,2,**}, В. В. Несынов¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

² Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН,
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

*E-mail: igelab@mail.ru

**E-mail: svetmil@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 08.08.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Проведен анализ результатов мониторинга сейсмических свойств типичных и неблагоприятных в инженерно-геологическом отношении грунтовых комплексов на Имеретинской низменности в период как строительства, так и эксплуатации олимпийских сооружений. Показано, как под влиянием техногенных факторов и благодаря возросшей детальности исследований менялись первоначальные представления о сейсмических свойствах грунтов II–III категории во время строительства и последующей эксплуатации олимпийских сооружений в 2011–2014 гг. На территорию размещения олимпийских объектов прибрежного кластера построена серия карт-схем сейсмического микрорайонирования (СМР), учитывающих эти изменения. Рассчитаны характеристики реакции геологической среды на сильные землетрясения по состоянию на период с 1986–1996 гг. (начало работ на участках перспективного освоения территории г. Сочи) по 2021 г. (после строительства и эксплуатации основных олимпийских объектов). Показано, что на отдельных участках с преобладающими в разрезе грунтами II–III категории по сейсмическим свойствам уже через 4–5 лет отмечен устойчивый тренд ухудшения, по сравнению с 2007 г., сейсмических свойств грунтов в сторону III категории. Приращение сейсмической интенсивности увеличилось на 0.5–0.7 балла. Для снижения негативного влияния сильных землетрясений на динамически неустойчивые грунты, где возможна потеря несущей способности грунтового основания за счет эффекта сейсмического разжижения, необходимо осуществлять превентивные мероприятия по улучшению сейсмических свойств грунтов. В процессе строительства необходимо предусматривать уплотнение таких грунтов путем создания, например, искусственного массива со свайным фундаментом.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, скорости поперечных волн, техногенные воздействия, расчетные методы, акселерограммы, искусственное улучшение грунтов оснований

DOI: 10.31857/S0869780922050083

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с нормативными картами ОСР-97(2015 А, В) и СП 14.13330.2018 территория г. Сочи с окрестностями относится, в привязке к средним грунтовым условиям по шкале MSK-64 к зонам 8-балльной сейсмичности при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9-балльной сейсмичности при повторяемости землетрясений 1 раз в 1000 лет. Карты ОСР-97(2015) составлены в кондициях масштаба 1:2500000 на основе расчета степени сейсмической опасности, выраженной в непрерывно изменяющихся по площади чис-

ленных значениях баллов, но в окончательном виде они отражают лишь целочисленные значения сейсмической интенсивности. Как признает автор карт В.И. Уломов [10], процедура такого “округления” влечет за собой погрешности, нередко превышающие ± 0.5 балла.

На основе базы данных ОСР-97 для района Сочи В.И. Уломовым [10] выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) в параметрах сейсмической интенсивности (I) в баллах шкалы MSK-64 с детализацией до 0.1 балла и в значениях пиковых ускорений A_{max} (см/с²)



Рис. 1. Территория Имеретинской низменности после начала ее освоения для строительства олимпийских сооружений.

для периодов повторяемости сильных землетрясений $T = 500$ и $T = 1000$ лет в привязке к грунтам II категории по сейсмическим свойствам. В соответствии с ВАСО исходная (фоновая) сейсмическая интенсивность (сотрясаемость) для территории Имеретинской низменности составляет $I = 8$ ($T = 500$ лет) и $I = 8.5$ ($T = 1000$ лет) баллов.

Большая часть территории Имеретинской низменности (рис. 1) представляла собой в конце 1980-х и начала 1990-х годов участки, перекрытые оросительными канавами, где выращивались овощные культуры местного совхоза. Естественная влажность грунта 72.4%. Постоянный водоносный горизонт фиксировался на глубинах от 0.5 до 2.5 м. Геологический разрез в заболоченных понижениях, которые использовались под сельскохозяйственные угодья, представлен лагунными осадками, ниже которых залегают пластичные иловатые глины с линзами песка и гравия, прослоями илов и торфяников общей мощностью 15–30 м. Ниже грунтовый массив представлен суглинками, супесями, глинами с редкими включениями щебня и дресвы. Общая мощность отложений 80–100 м [1]. С учетом геологического строения, гидрогеологических условий, литологического состава отложений и их физико-механических свойств грунты были отнесены к III категории по сейсмическим свойствам.

По результатам исследований 1986–1996 гг. приращение балльности по методу сейсмических

жесткостей (МСЖ) составили $\Delta I = +1.05$ – $+1.30$ балла (средневзвешенная скорость до глубины 30 м равна $V_{s30} = 150$ – 160 м/с, средневзвешенная плотность $\rho = 1.55$ – 1.65 г/см³). При расчете реакции геологической среды на воздействия сильных землетрясений [6–8] максимальные значения ускорений: от близких зон ВОЗ составили $A_{\max} = 450$ см/с²; от относительно удаленной Сухумской зоны ВОЗ – 465 см/с². Фрагмент карты сейсмического микрорайонирования (СМР), разработанной по результатам исследований 1986–1996 гг., приведен на рис. 2.

Цель ниже изложенных результатов – показать влияние техногенных факторов и детальных исследований на изменение первоначальных представлений о сейсмических условиях на слабых грунтах Имеретинской низменности (III категории по сейсмическим свойствам), а также обратить внимание на возможность улучшения несущей способности таких грунтов (их уплотнения) для дальнейшего освоения рассматриваемой территории путем создания массивов со свайным фундаментом и интенсивного понижения уровня подземных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В 2007 г. было проведено сейсмическое микрорайонирование территории Имеретинской низ-

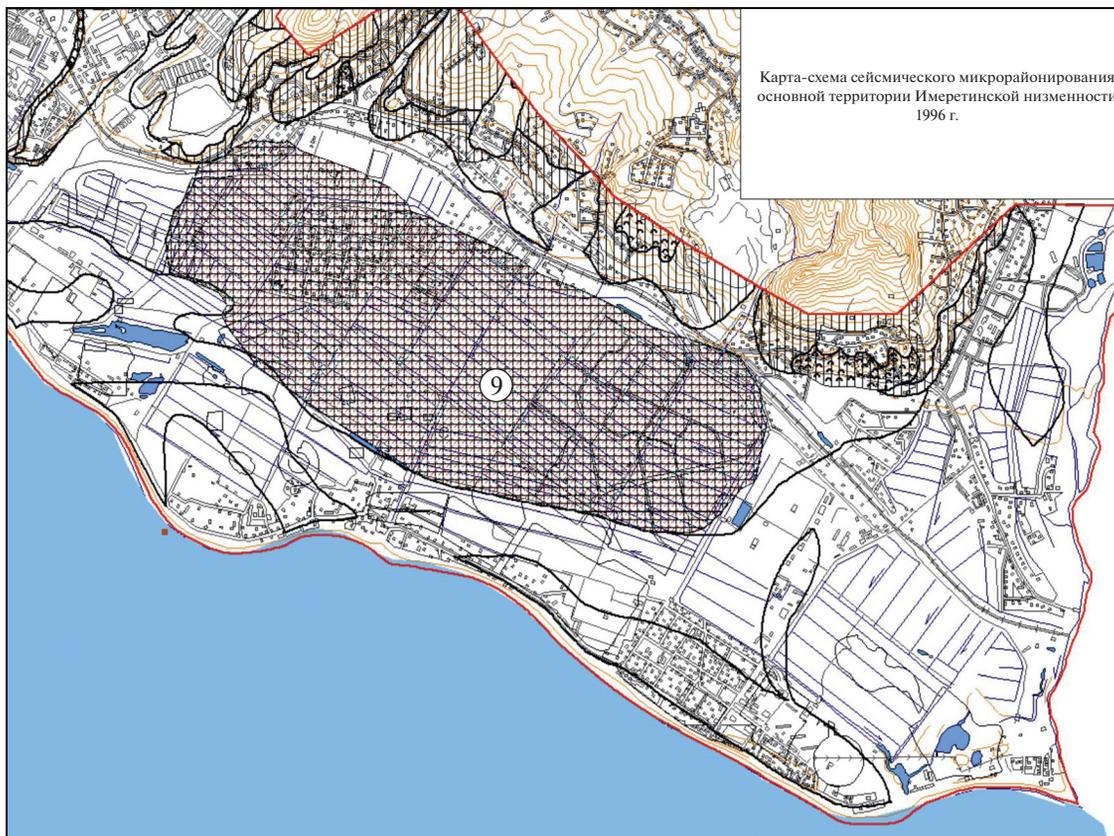


Рис. 2. Фрагмент карты-схемы СМР территории Имеретинской низменности (1996 г.). Участок с сейсмичностью 9 баллов выделен густой штриховкой; красный контур – граница территории Имеретинской низменности.

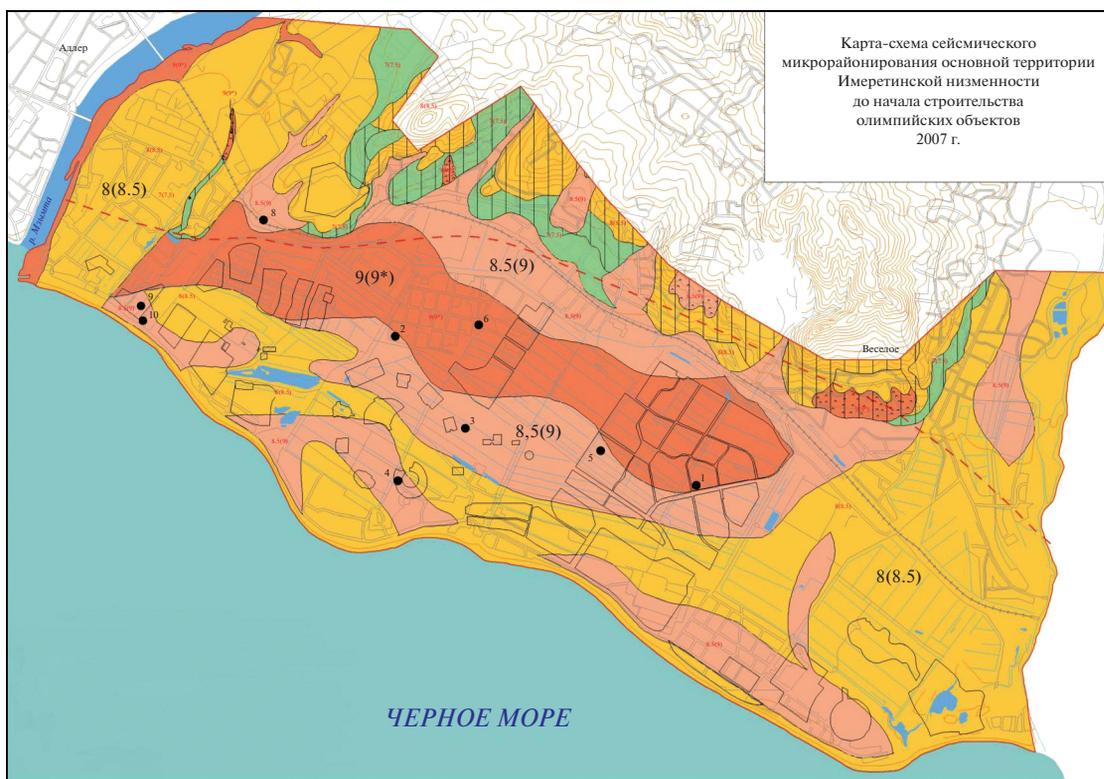
менности в масштабе 1:10000, предназначенное для выбора наиболее благоприятных в сейсмическом отношении участков размещения олимпийских объектов. При изысканиях было установлено, что при подготовке рассматриваемой территории под строительство на ряде участков с грунтами III категории были улучшены первоначальные сейсмические условия в результате проведения мелиоративных и планировочных работ (замена грунтов III категории насыпными с последующим их уплотнением).

После проведения новых исследований по СМР для целей размещения олимпийских объектов [9] и на основании комплексных исследований за более чем 20 лет, начиная с 1986 г., в 2007 г. была построена карта СМР территории Имеретинской низменности масштаба 1:10000, приведенная ниже на рис. 3, вид которой существенно изменился по сравнению с картой 1996 г. В местах предполагаемого размещения олимпийских сооружений после проведения водопонижения и замены верхней части грунтов III категории, где было возможно, выделены участки с грунтами II–III категории с сейсмичностью $I = 8.5$ баллов при повторяемости 1 раз в 500 лет и 9 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет для ответственных сооружений, а также участки с не-

измененными грунтами III категорий по сейсмическим свойствам с сейсмичностью соответственно 9 и 9* баллов.

Участки с грунтами II–III категории (зона 3, см. условные обозначения к рис. 3) сложены разнородными песками, глинами, суглинками с прослоями гравийно-галечниковых грунтов, грунтовые воды на глубине от 3 до 5 м. Общая мощность отложений 60–80 м. Приращения балльности по СМР относительно эталонных грунтов II категории составили $\Delta I = +0.35$ – $+0.52$ балла ($V_{s30} = 230$ – 250 м/с при $\rho = 1.75$ – 1.90 г/см³). Здесь возможны максимальные значения ускорений: от близких зон ВОЗ $A_{max} = 295$ см/с² и от Сухумской зоны – 285 см/с².

Участки с грунтами III категорий 9 и 9* баллов (зона 4) сложены пластичными иловатыми глинами с линзами песка и гравия, прослоями илов и торфяников, суглинками, супесями, глинами с редкими включениями щебня и дресвы, грунтовые воды на глубине 1–4 м, где $\Delta I = +1.0$ – $+1.20$ балла ($V_{s30} = 160$ – 165 м/с при $\rho = 1.60$ – 1.65 г/см³). Общая мощность отложений 80–100 м, на них возможны максимальные значения ускорений: от близких зон ВОЗ $A_{max} = 415$ см/с² и от Сухумской зоны ВОЗ – 455 см/с².



Условные обозначения

<div style="border: 1px solid black; background-color: #90EE90; padding: 5px; width: 60px; margin-bottom: 10px; display: inline-block;">7(7.5)</div> <p>1 – Зона с сейсмичностью 7 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 7.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #FFDAB9; padding: 5px; width: 60px; margin-bottom: 10px; display: inline-block;">8.5(9)</div> <p>3 – Зона с сейсмичностью 8.5 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>
<div style="border: 1px solid black; background-color: #FFD700; padding: 5px; width: 60px; margin-bottom: 10px; display: inline-block;">8(8.5)</div> <p>2 – Зона с сейсмичностью 8 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 8.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #FF8C00; padding: 5px; width: 60px; margin-bottom: 10px; display: inline-block;">9(9*)</div> <p>4 – Зона с сейсмичностью 9 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9* баллов (более 9 баллов) при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>
<div style="border: 1px solid black; width: 60px; height: 60px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin-bottom: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; width: 20px; height: 20px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> 5 </div> </div> <p>Место и номер экспериментальных исследований</p>	

Рис. 3. Карта-схема СМР территории Имеретинской низменности (2007 г.) после подготовки территории под строительство олимпийских объектов.

Впоследствии при решении задач СМР на территории Имеретинской низменности непосредственно под объекты строительства проводились дополнительно крупномасштабные инженерно-геологические исследования. Кроме того, для расчетов антисейсмических мероприятий для отдельных объектов потребовались более детальные геофизические исследования. Авторами было проведено обобщение результатов крупномасштабных инженерно-геологических и геофизических исследований по СМР на ряде площадок в пределах Имеретинской низменности, выполненных в период с 2007 по 2012 г. Результаты экспериментальных исследований сейсмических свойств грунтовых комплексов в различных местах строи-

тельства олимпийских сооружений, проведенные до начала строительства и через 4–5 лет, показали изменения первоначальных сейсмических условий из-за ухудшения свойств грунтов верхней части разреза. Примером могут служить работы по СМР на участках строительства олимпийских гостиничных комплексов (“Апарт-отель” в 2011 г. и “Четырехзвездный комплекс на 700 номеров” в 2012 г.) на грунтах II–III категории с первоначальной сейсмичностью по карте СМР 2007 г. 8.5 (9) баллов. Инженерно-сейсмические исследования показали, что по прошествии времени грунты по сейсмическим свойствам уже следовало относить к III категории, так как средневзвешенная объемная плотность стала равной

$\rho = 1.70\text{--}1.75 \text{ г/см}^3$, а средние значения скоростей V_{s30} уменьшились до значений 180–200 м/с. При этом значения приращения сейсмической интенсивности возросли до $\Delta I = +0.60\text{--}+0.85$ балла, а A_{\max} по расчетам увеличились с 305–330 см/с² до 380 см/с² (от близких зон ВОЗ) и от Сухумской зоны ВОЗ от 300–335 см/с² до 380–390 см/с². Таким образом, результаты дополнительных детальных исследований (под конкретные сооружения) показали возможность изменения первоначальных представлений о сейсмических свойствах грунтов.

Экспериментальные исследования свойств грунтов [5] территории Центрального Олимпийского стадиона [5] показали наличие на Имеретинской низменности грунтов, которые подвержены риску сейсмического разжижения во время землетрясений (интенсивных сейсмических нагрузок). Наличие таких грунтов может привести к катастрофическим осадкам грунтовых оснований сооружений, что повлияет на их эксплуатационную надежность и способно привести к их разрушению.

Известно, что увеличению риска сейсмического разжижения грунтов способствует техногенное повышение уровня грунтовых вод (УГВ), а также возможное проявление барражного эффекта от возводимых фундаментов олимпийских зданий и сооружений.

К техногенным факторам, влияющим на грунтовый массив, помимо этого, можно отнести ухудшение прочностных и деформационных свойств грунтов оснований сооружений. При замене грунтов естественного сложения на насыпные в результате проведения планировочных работ для строительства ухудшаются первоначальные физико-механические свойства массива. При сильных землетрясениях возможна деформация грунтов оснований сооружений, возводимых на насыпных грунтах обратной засыпки, и также возрастает риск их сейсмического разжижения. На основании выполненных исследований авторы составили детальную карту-схему СМР для современной поверхности Имеретинской низменности с учетом проведенных дополнительных крупномасштабных исследований сейсмических свойств грунтов и влияния техногенных факторов — интенсивного строительства и эксплуатации сооружений, построенных после 2007 г. (рис. 4).

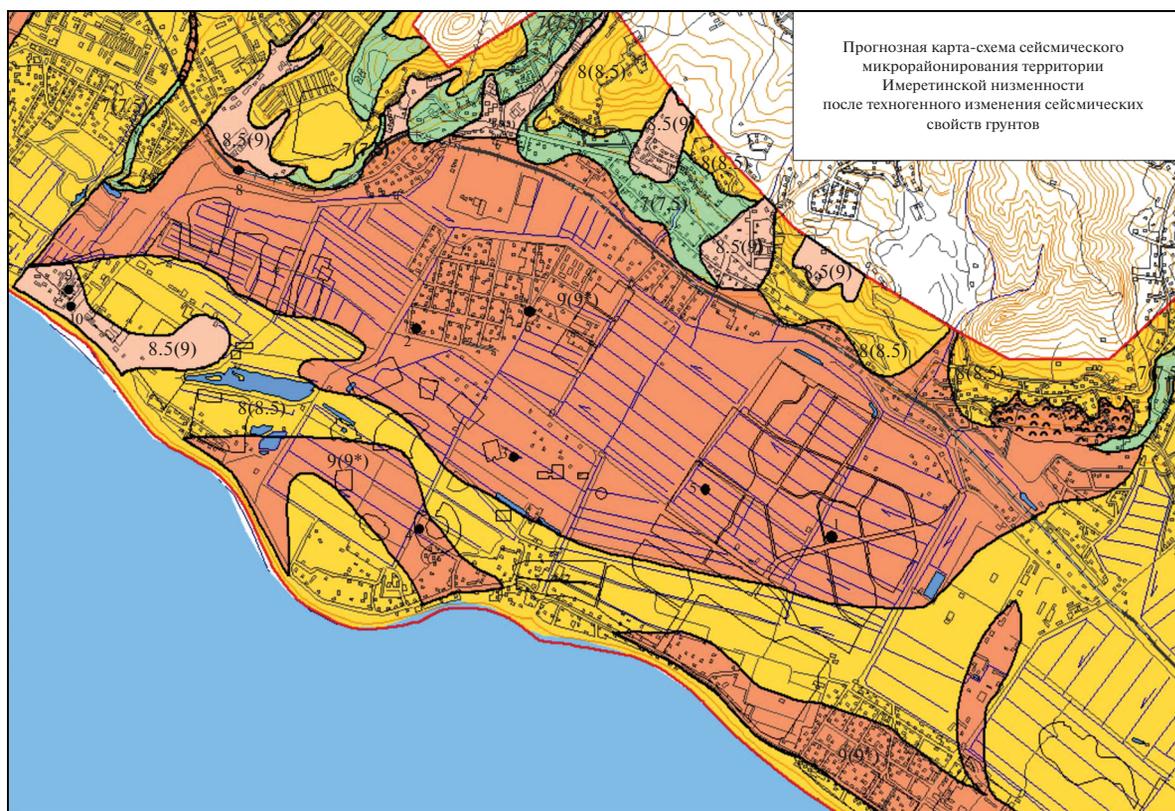
На новой карте с учетом данных мониторинга отмечены произошедшие с течением времени изменения на поверхности грунтовых комплексов под действием техногенных факторов после сооружения и эксплуатации олимпийских объектов по сравнению с картой СМР 2007 г. Увеличение территории с грунтами III категории и сейсмичностью 9(9*) баллов связано с тем, что часть участков с грунтами II–III категории (по состоянию на 2007 г.) по своим свойствам стали ближе к грунтам III категории, и по результатам исследо-

ваний 2010–2014 гг. они могут быть отнесены к участкам с грунтами зоны 4. Площадки и расположение участков с грунтами II–III, II категорий и соответствующей сейсмичностью 8.5 (9) и 8 (8.5) баллов, относящиеся к зонам 3 и 2 (см. рис. 4), не претерпели существенных изменений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИСКУССТВЕННОМУ УЛУЧШЕНИЮ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ПОД ФУНДАМЕНТАМИ СООРУЖЕНИЙ

В ходе исследований авторы видели свою задачу не только в прогнозе изменения сейсмических условий под действием техногенных факторов, но и в выработке предложений по снижению негативного влияния последних для улучшения сейсмических условий на изучаемой территории. Известно, что искусственно подготовленное основание в большинстве случаев позволяет снизить сейсмичность площадки и вести строительство в районах с сейсмичностью 9 баллов и более. На динамически неустойчивых грунтах, где возможна активизация просадочных процессов, для улучшения грунтов основания и снижения риска сейсмического разжижения, кроме мероприятий по водопонижению, проводят уплотнение грунтов путем создания искусственного свайного поля. Могут быть использованы также методы химического закрепления грунтов оснований (закрепление геокомпозитным материалом, цементацией и т.п.).

В статье В.А. Ильичева и др. [3] приводятся результаты расчетной оценки влияния искусственного улучшения грунтового основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний. Расчетная оценка, основанная на конечноэлементной реализации, позволила определить размеры площадей, на которых необходимо проводить инженерную подготовку оснований с тем, чтобы перевести грунты III категории по сейсмическим свойствам во II категорию. Были проведены численные исследования по оценке влияния величины и характеристик включений в грунтовое основание на интенсивность и спектральный состав сейсмических воздействий. В качестве расчетного воздействия использовалась акселерограмма землетрясения Сан-Фернандо. Моделировались основания, подготовленные с помощью грунтонабивных свай или грунтовых подушек, а также химического закрепления. Из проведенного анализа следует, что величина максимальных средних ускорений на поверхности включения зависит от размеров включения, причем оптимальная ширина включения, при которой ускорения имеют наименьшие значения, равна полуторной толщине слоя. Увеличение ширины включения более чем на три толщины слоя не изменяет амплитуды ускорений. Также было установлено, что искусственная под-



Условные обозначения

<div style="border: 1px solid black; background-color: #90EE90; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">7(7.5)</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #FFD700; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">8(8.5)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">5</div>	<p>1 – Зона с сейсмичностью 7 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 7.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p> <p>2 – Зона с сейсмичностью 8 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 8.5 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p> <p>Место и номер экспериментальных исследований</p>	<div style="border: 1px solid black; background-color: #FFDAB9; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">8.5(9)</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #FF8C00; padding: 5px; display: inline-block; margin-bottom: 10px;">9(9*)</div>	<p>3 – Зона с сейсмичностью 8.5 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9 баллов при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p> <p>4 – Зона с сейсмичностью 9 баллов при повторяемости землетрясений 1 раз в 500 лет и 9* баллов (более 9 баллов) при повторяемости 1 раз в 1000 лет</p>
---	---	--	---

Рис. 4. Карта-схема СМР для современной поверхности Имеретинской низменности с учетом результатов дополнительных детальных исследований и влияния техногенных факторов.

готовка основания вызывает перераспределение энергии сейсмических воздействий, поэтому необходимо проводить анализ спектральных характеристик при учете сейсмостойкости здания и установленного в нем оборудования. Расчетами было показано, что подготовка основания, выполненная грунтонабивными сваями (грунтовой подушкой) и методом химического закрепления, позволяет прогнозировать снижение балльности строительной площадки на 0.5–1.0 балла. Исследования [3, 4] по экспериментальной проверке степени улучшения сейсмических условий строительства под фундаментами зданий и сооруже-

ний, опирающихся на свайное основание, показали возможность понижения не только балльности строительной площадки, но и уровня сейсмических воздействий.

Устройство свайного основания является более технологичным и экономически оправданным методом улучшения сейсмических свойств грунтов оснований, чем цементация грунтов и их закрепление другими способами [2]. Примером проверки положений, изложенных в работах [3, 4], и дальнейших исследований по искусственному улучшению массива грунтов, созданного свайным полем железобетонных свай под фундамен-

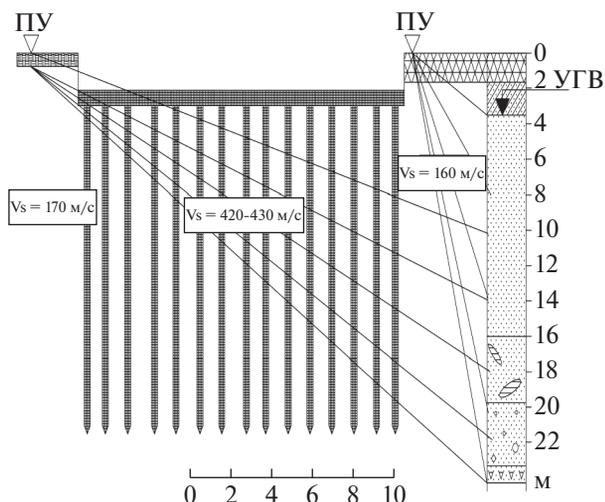
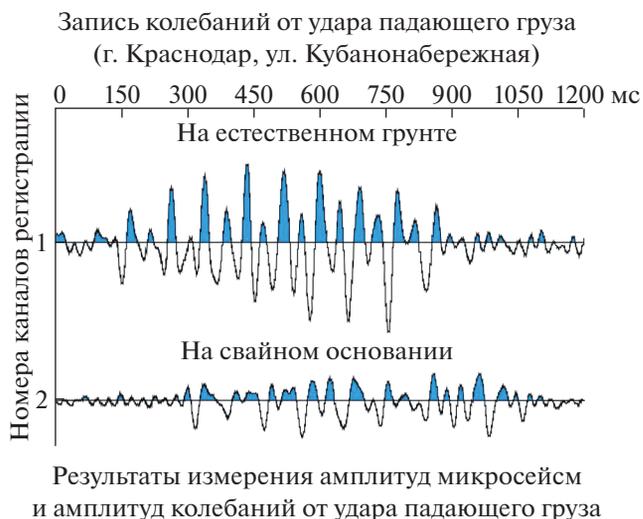


Рис. 5. Схема проведения исследований по сейсмическому просвечиванию под фундаментом строящегося здания и вертикальному сейсмическому профилированию (ВСП) в скважине, расположенной на естественном грунте между пунктом возбуждения колебаний (ПУ) на поверхности и сейсмоприемниками на зонде в скважине. В рамках — средние значения скоростей поперечных волн (V_s) по результатам исследований из [9].

том строящегося здания, могут служить результаты работ авторов на водонасыщенных песчано-глинистых грунтах III категории пойменных отложений р. Кубань (в г. Краснодар, ул. Кубанонабережная) [9]. Сейсмические характеристики искусственного массива изучались с применением вертикального сейсмического профилирования (метод ВСП) и просвечивания по наклонным лучам. Пойменные отложения представлены переслаиванием суглинков от мягкопластичных до текучепластичных и песками пылеватыми средней плотности. В естественном состоянии вне поля свай грунты характеризуются плотностью $\rho = 1.95 \text{ г/см}^3$, скорости S-волн изменяются от 120 в верхнем слое до 210–220 м/с на глубине 20–22 м. Средняя скорость S-волн по данным ВСП в этой толще — 150–170 м/с.

Искусственный массив создан полем свай размером в плане $28 \times 35 \text{ м}$. Железобетонные сваи размером $25 \times 25 \text{ мм}$ и длиной около 18 м располагались в шахматном порядке по сетке $1.5 \times 1.5 \text{ м}$. Схема наблюдений и результаты просвечивания массива, созданного полем свай, показаны на рис. 5.

Среднее значение V_s в пределах свайного поля оценивается в 420–430 м/с. Расчетная плотность с учетом объема железобетонных свай в искусственном основании составила 2.25 г/см^3 . Таким образом, сейсмическая жесткость в поперечных волнах в пределах поля свай увеличилась относительно жесткости естественных грунтов в 3 раза. По данным регистрации колебаний от ударов па-



Тип источника колебаний	Среднемаксимальная амплитуда, мм при записи колебаний		Расчет приращений интенсивности ΔI , балл	
	на поверхности естественного грунта \bar{A}_p	на фундаменте $\bar{A}_ф$	$\Delta I = 2 \lg \bar{A}_ф / \bar{A}_p$	$\Delta I = 3,3 \lg \bar{A}_ф / \bar{A}_p$
Микросейсм	17	9.1	-0.6	-
Колебания от удара падающего груза	18	11.1	-	-0.7

Рис. 6. Пример записи колебаний и результатов измерений амплитуд колебаний на фундаменте сооружения, опирающегося на сваи, по сравнению с амплитудами колебаний на поверхности естественного грунта от ударов падающего груза массой около 1 т с высоты 4 м.

дающего груза (массой около 1 т с высоты 4 м) и микросейсм, среднемаксимальные амплитуды колебаний на фундаменте, опирающемся на сваи, по сравнению с амплитудами колебаний на поверхности естественного грунта тоже уменьшились в 1.8–2 раза (рис. 6).

Такие же исследования по качественной оценке искусственного улучшения сейсмических условий для оснований сооружений на грунтах III категории были проведены на территории олимпийских объектов Имеретинской низменности. Для уточнения сейсмических условий площадки размещения Апарта-отеля категории 4 звезды на 200 номеров в г. Сочи после проведения инженерной подготовки площадки для строительства были выполнены комплексные инструментальные геофизические исследования. В искусственном массиве, созданном полем буронабивных свай диаметром 800–1000 мм и длиной более 20 м, расположенных в шахматном порядке на расстоянии друг от друга 1.5–2.0 м, в сравнении с естественными грунтами произошло увеличение скорости поперечных волн в 2.5–3 раза (до 630–800 м/с). Даже не принимая во внимание не-

Таблица 1. Изменение сейсмических условий на грунтах II–III и III категорий Имеретинской низменности после искусственного закрепления грунтов оснований устройством свайного фундамента

Название участка	№ экспериментальных исследований на картах СМР	Категория грунтов по сейсмическим свойствам	Год исследования	Сейсмоактивные зоны	На поверхности естественных грунтов			После улучшения грунтов основания A_{max}	
					T_{max} , с	τ , с	A_{max} , см/с ²	I $V_{scv} = 450$ м/с	II $V_{scv} = 700$ м/с
Имеретинская низменность	1	III	1985–1998	Ближкие	0.30	10	450	–	–
Имеретинская низменность (обобщенные)	6	III	2007	Ближкие	0.30	10	415	310	295
					0.70	20	465	415	405
Апарт-отель	2	III (II–III)	2011 (2007)	Ближкие	0.29	10–11	380 (330)	275	265
					0.68	20–21	390 (335)	350	345
Имеретинская низменность (обобщенные)	3	II–III	2007	Ближкие	0.29	9–11	295	225	220
					0.70	20	285	250	245
Центральный олимпийский стадион (разжижение)	4	II–III (III–IV)	2011	Ближкие	0.30	10–12	300	225	220
					0.70	20–30	290	255	250
Четырехзвездный гостиничный комплекс на 700 номеров	5	III (II–III)	2012 (2007)	Ближкие	0.28–0.29	10–11	380 (305)	285	275
					0.65	20–21	385 (300)	345	340
Основная олимпийская деревня (3000 мест). ОАО “Росстройзыскания” Зоны 1, 2	9 и 10	II–III	2010–2011	Акселеро-грамма, обобщенная из двух зон ВОЗ	–	25–27	260–290	–	–

T_{max} – период колебаний в максимальных пиковых ускорениях; τ – эффективная продолжительность колебаний; V_{scv} – скорости в массиве со свайным фундаментом; A_{max} , см/с² – рассчитанные максимальные (пиковые) значения ускорений, осредненные по компонентам X, Y, для периода повторяемости 1 раз в 1000 лет. В круглых скобках указаны категории грунтов и осредненные максимальные значения ускорений в год исследования.

сколькo увеличенную плотность искусственного массива, в терминах сейсмического балла произошло снижение сейсмичности по крайней мере на 0.5 балла, определенной по МСЖ в соответствии с действующими нормативными документами, что следует отнести в запас относительно принимаемой сейсмичности. Кроме того, были продолжены эксперименты по измерению амплитуд колебаний на фундаменте строящегося сооружения, опирающегося на свайное поле, по сравнению с амплитудами колебаний на свободной поверхности грунта. Регистрировались колебания (импульсными источниками колебаний) от удара падающего груза массой около 700 кг с высоты 4 м. Расстояния между установленными на грунте и на фундаменте регистрирующими датчиками и импульсным источником колебаний были одинаковыми. Колебания от импульсных источников записывались при разной длительности. Соотношение между амплитудами колебаний на поверхности грунтовой толщи и опирающемся на сваи фундаменте в случае возбуждения колебаний от сбрасываемого груза оказались меньше, чем на поверхности естественного грунта в 1.5–2 раза. Таким образом, устройство свайного основания (с опорой свай на плотные слабо сжимаемые галечниковые грунты, кровля которых на глубине более 20 м) улучшило сейсмические условия строительства.

Наши и исследования других авторов показывают возможность понижения балльности строительной площадки и уровня сейсмических воздействий под фундаментами зданий и сооружений, опирающихся на свайное основание.

По результатам исследований была составлена таблица изменения сейсмических условий на грунтах II–III и III категорий для территории Имеретинской низменности после искусственного закрепления грунтов оснований устройством свайного фундамента (табл. 1).

Результаты предварительного расчета акселерограмм на типичных грунтовых комплексах, слагающих большую часть Имеретинской низменности, по программе “Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред”, разработанной в ИФЗ РАН [6–8], показывают тенденцию к уменьшению значений A_{max} и улучшению сейсмических свойств грунтов основания при создании в них свайных полей. Близкие результаты были получены при расчете по программе “NERA” [11]. Были рассмотрены два случая, когда искусственный массив со свайным фундаментом характеризуется средними значениями $V_s = 450$ м/с (случай I) и при $V_s = 700$ м/с (случай II) на глубину 30 м.

Рассмотренные выше результаты экспериментальных проверок изменения сейсмических усло-

вий под фундаментами зданий и сооружений в результате устройства искусственных оснований показывают, что эти изменения возможно прогнозировать. Прогнозная оценка сейсмических свойств грунтов после их улучшения методами инженерной подготовки может быть проведена с помощью соответствующего моделирования новых геосейсмических условий с последующим расчетом характеристик сейсмических воздействий по известным программам.

По данным выполненных опытных исследований по искусственному закреплению массива грунтов III категории (устройство свайного основания с опорой свай на плотные слабо сжимаемые галечниковые грунты) улучшило сейсмические условия строительства ориентировочно на 0.5 балла. При этом расчетные значения A_{max} могут уменьшаться на 20–30%. На таких “улучшенных грунтах” после предварительного проведения инженерной подготовки территории возможно дальнейшее строительство при освоении Имеретинской низменности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для оценки изменения первоначальных сейсмических условий под влиянием техногенных факторов предлагается совместное использование расчетных методов с традиционными сейсмо-разведочными и инженерно-геологическими исследованиями.

2. Совместное применение эмпирических и расчетных методов значительно повышает обоснованность прогноза сейсмической опасности, выраженной в единицах сейсмической интенсивности либо в форме расчетных акселерограмм.

3. На примере современной территории Имеретинской низменности показано, как менялись сейсмические свойства и сейсмические условия на грунтах II–III и III категорий под действием техногенных факторов, начиная с 1990-х годов (начало исследований для СМР), после подготовки территории под будущее строительство (2007 г.) и начала строительства олимпийских сооружений и последующей их эксплуатации (2011–2014 гг.). Примером могут служить некоторые участки с грунтами II–III категории (2007 г.), которые по сейсмическим свойствам ухудшились и стали ближе к III категории через 4–5 лет после строительства олимпийских сооружений. Изменились также характеристики сейсмических воздействий: кривые динамичности, максимальные (пиковые) значения ускорений (A_{max}), преобладающий период колебаний в максимальных пиковых ускорениях (T_{max}). Следует также отметить, что при проведении крупномасштабных (более детальных) исследований могут меняться перво-

начальные представления о сейсмических свойствах грунтов.

4. Построена новая карта-схема СМР (по сравнению с картой 2007 г.) для современной поверхности Имеретинской низменности с учетом результатов детальных исследований и изменений сейсмических свойств грунтов под действием техногенных факторов – интенсивного строительства. Для разных участков на этой карте были предположительно оценены максимальные значения расчетных акселерограмм (A_{\max}).

5. Исследования показали, что новое строительство и реконструкция ранее построенных сооружений на территории Имеретинской низменности возможны только после предварительного проведения инженерной подготовки территории, заключающейся в выполнении интенсивного принудительного осушения и улучшения несущей способности илистых и песчано-глинистых грунтов оснований.

6. При проектировании и строительстве на грунтах III категории по сейсмическим свойствам для выяснения степени улучшения сейсмических условий относительно естественных после устройства искусственного основания, в том числе свайного, следует проводить специальные инженерно-сейсмологические исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабанов И.П., Гей Н.А. История развития Имеретинской лагуны в междуречье Мзымта-Псоу // Черноморский регион в условиях глобальных изменений климата: закономерности развития природной среды за последние 20 тыс. лет и прогноз на текущее столетие. М.: Географический ф-т МГУ, 2010. С. 25–41.
2. Голованов А.М., Пашков В.И., Рево Г.А. Опыт укрепления просадочных и насыпных грунтов оснований фундаментов зданий и сооружений цементацией // Сб. научных трудов. Ростов-на-Дону: ОАО Институт “Ростовский Промстройиниипроект”, 2004. С. 68–71.
3. Ильичев В.А., Курдюк А.Ю., Лиховцев В.М. Методика оценки влияния искусственного основания на интенсивность и спектральный состав сейсмических колебаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. № 6. С. 28–30.
4. Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Изменение сейсмических свойств грунтов в основании зданий и сооружений во времени, а также после их улучшения методами инженерной подготовки // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 35–37.
5. Озмидов О.Р. Оценка риска сейсмического разжижения грунтов геологического основания объектов олимпийского строительства в г. Сочи // Вестник Российской академии естественных наук. Инженерная геология. 2014. № 1. С. 48–54.
6. Ратникова Л.И. Расчет колебаний на свободной поверхности и во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1984. С. 116–121.
7. Ратникова Л.И. Метод расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М.: Мир, 1973. 124 с.
8. Ратникова Л.И., Левшин А.Л. Расчет спектральных характеристик тонкослоистых сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 3. С. 41–53.
9. Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Количественные характеристики сейсмических воздействий на ряде строительных объектов в г. Сочи по данным исследований последних лет // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 5. С. 71–74.
10. Уломов В.И. Вероятностно-детерминированная оценка сейсмических воздействий на основе карт ОСР-97 и сценарных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. 2005. № 4. С. 60–69.
11. Bardet J.P., Tobita T. NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering. January 2001. 44 p.

MONITORING OF ENGINEERING GEOLOGICAL AND SEISMIC PROPERTIES OF SOILS DURING CONSTRUCTION AND OPERATION OF OLYMPIC FACILITIES (SOCHI, IMERETIAN LOWLAND)

B. A. Trifonov^{a,#}, S. Yu. Milanovskii^{a,b,##}, and V. V. Nesynov^a

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, B. Gruzinskaya ul., 10, str. 1, Moscow, 123242 Russia*

[#] *E-mail: igelab@mail.ru*

^{##} *E-mail: svetmil@mail.ru*

We analyzed the results of experimental studies of temporal changes in seismic conditions for typical soil complexes unfavorable in engineering and geological terms on Imereti Lowland during the construction and operation of Olympic facilities. It is shown how seismic conditions have changed for soils (category II–III) under the influence of technogenic factors after the construction in 2011–2014 and subsequent operation of Olympic facilities. For this territory, a number of seismic microzoning (SMZ) maps was built with changing

seismic conditions depending on technogenic factors from 1986–1996 (start of work in the areas of future development in Sochi) till 2014–2021 (the end of construction and operation of the main Olympic facilities). According to our research results, the Imereti Lowland was classified as a territory with seismic intensity (I) more than 9 (category III) in 1986–1996. In the areas of expected Olympic facilities location (after engineering preparation of this territory for construction), the areas with soils of II–III categories with seismic intensity $I = 8.5$ and 9 with a frequency of 500 and 1000 years, respectively (for important structures) were mainly distinguished in the map of SMZ (2007). There are also some areas with primary soils (category III) with seismic intensity of 9 and more (9*). The studies in the territory of constructed and planned Olympic facilities have revealed the changes in the initial seismic properties in a number of areas with soils of category II–III. During 4–5 years, under the influence of technogenic factors on the soil massif, the seismic intensity increased by 0.5–0.7; and soils became closer to category III. In addition, the risk of possible seismic liquefaction of soils rose there. In our new SMZ map (for the years after 2014), more sections of III and II categories are outlined with seismic intensity of 9 (9*) and 8 (8.5), respectively, as compared to the map for 2007. To reduce the negative impact of technogenic factors and improve seismic conditions on the territory of the Imereti Lowland, it is proposed to create an artificially prepared foundation for the construction. On dynamically unstable soils, where subsidence may intensify, in order to improve properties of the foundation soils and to reduce the risk of seismic liquefaction, it is proposed to stabilize soils by creating an artificial pile foundation in addition to lowering of the water level. Examples are given of the artificial improvement of the soil massif created by piles foundations of buildings under construction. It is shown that the creation of a pile foundation for strengthening soil massif of category III reduces the maximum accelerations A_{\max} by 25–30% from the close zones of the origin of earthquake (ZOE), generating high-frequency earthquakes, and by 10–14% from remote Sukhumi ZOE zone, which generates low-frequency earthquakes.

Keywords: seismic microzoning, shear wave velocities, technogenic impacts, computational methods, accelerograms, artificial improvement of foundation soils

REFERENCES

- Balabanov, I.P., Gey, N.A. *Istoriya razvitiya Imeretinskoj laguny v mezhdurech'e Mzymta-Psou* [The history of the development of the Imeretian lagoon (Lowland) in the interfluvium of the Mzymta-Psou]. *Chernomorskii region v usloviyakh global'nykh izmenenii klimata: zakonmernosti razvitiya prirodnoi sredy za poslednie 20 tys. let i prognoz na tekusyhchee stoletie* [The Black Sea region under the global climate change: patterns of development of the natural environment over the past 20 thousand years and forecast for the current century]. Moscow, Geographic Faculty of the Moscow State University, 2010, pp. 25–41. (in Russian)
- Golovanov, A.M., Pashkov, V.I., Revo, G.A. *Opyt zakrepleniya prosadochnykh i nasypnykh gruntov osnovanii fundamentov zdaniy i sooruzhenii tsementatsiei* [Experience in cementation grouting of collapsible and fill soils in the basement of buildings and engineering structures]. Collection of scientific papers. Rostov-on-Don, Rostov PromStroyNiiProekt Publ., 2004, pp. 68–71. (in Russian)
- Il'ichev, V.A., Kurdyuk, A.Yu., Likhovtsev, V.M. *Metodika otsenki vliyaniya iskusstvennogo osnovaniya na intensivnost' i spektral'nyi sostav seismicheskikh kolebanii* [Procedure of evaluating the artificial foundation influence on the intensity and spectral composition of seismic vibrations]. *Osnovaniya, fundamenty, i mekhanika gruntov*, 1992, no. 6, pp. 28–30. (in Russian)
- Mindel, I.G., Trifonov, B.A. *Izmenenie seismicheskikh svoystv gruntov v osnovanii zdaniy i sooruzhenii vo vremeni, a takzhe posle ikh uluchsheniya metodami inzhenernoi podgotovki* [Changes of seismic properties of soils at the base of buildings and constructions in time, as well as after their improvement by engineering preparation methods]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2003, no. 10, pp. 35–37. (in Russian)
- Ozmidov, O.R. *Otsenka riska seismicheskogo razhizheniya gruntov geologicheskogo osnovaniya ob'ektov olimpiiskogo stroitel'stva v g. Sochi* [Estimation of the risk of seismic liquefaction of soils in geological foundation under the Olympic engineering structures in Sochi]. *Vestnik RAEN. Inzhenernaya geologiya*, 2014, no. 1, pp. 48–54. (in Russian)
- Ratnikova, L.I. *Raschet kolebanii na svobodnoi poverkhnosti i vo vnutrennikh tochках gorizontally sloistogo pogloshchayushchego grunta* [Oscillation calculation on the free surface and in the internal points of a horizontally layered absorbing soil]. *Seismicheskoe mikroraiionirovanie* [Seismic microzoning]. Moscow, Nauka Publ., 1984, pp. 116–121. (in Russian)
- Ratnikova, L.I. *Metod rascheta seismicheskikh voln v tonkosloistnykh sredakh* [Method for calculating seismic waves in thin-layered media]. Moscow, Mir Publ., 1973, 124 p. (in Russian)
- Ratnikova, L.I., Levshin, A.L. *Raschet spektral'nykh kharakteristik tonkosloistnykh sred* [Calculation of spectral characteristics of thin-layered media]. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 1967, no. 3, pp. 41–53. (in Russian)
- Sevostyanov, V.V., Mindel, I.G., Trifonov, B.A. *Kolichestvennye kharakteristiki seismicheskikh vozdeystvii na ryade srtoitel'nykh ob'ektov v g. Sochi po dannym issledovaniy poslednikh let* [Quantitative characteristics of seismic impacts on a number of construction facilities' in Sochi according to recent studie]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2005, no. 5, pp. 71–74. (in Russian)
- Ulomov, V.I. *Veroyatnostno-determinirovannaya otsenka sermicheskikh vozdeystvii na osnove kart OSR-97 i stsenarnykh zemletryasenii* [Probabilistic-deterministic assessment of seismic impacts based on OSR-97 maps and scenario earthquakes]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, 2005, no. 4, pp. 60–69. (in Russian)
- Bardet, J.P., Tobita, T. NERA: A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, January 2001, 44 p.