

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----|---------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Название<br>журнала                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                              | ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ |     |               |   |  |     |
| Издательство                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                              | Геомаркетинг        |     |               |   |                                                                                     |     |
| Год выпуска                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                              | 2012                | Том | Номер выпуска | 5 |                                                                                     |     |
|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
| Название статьи                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   | Страницы                                                                            | Цит |
| КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА                                                          |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|    | ПРЕИМУЩЕСТВА ПЛАНОВОГО ХОЗЯЙСТВА<br>Богданов М.И.                                                                                                                                                                                            |                     |     |               |   | 5-9                                                                                 | 0   |
| ИСТОРИЯ, ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ                                                       |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|    | ИРИНА МИХАЙЛОВНА ГОРЬКОВА (1912-1999) (К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)<br>Шобакова В.С.                                                                                                                                                          |                     |     |               |   | 10-18                                                                               | 0   |
|    | ИРИНА МИХАЙЛОВНА ГОРЬКОВА (1912-1999) — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ (К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)<br>Платов Н.А., Потапов А.Д., Лаврусевич А.А., Коробанова Н.Г., Лаврова Н., Клинова Г.И., Басинская Е.В., Кротова А.В. |                     |     |               |   | 19                                                                                  | 0   |
| ГРУНТОВЕДЕНИЕ                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|    | ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ<br>Бабенко В.А., Никифоров Н.В., Вознесенский Е.А.                                                |                     |     |               |   | 20-35                                                                               | 0   |
| ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА                                                              |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|  | УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ В ОТЛОЖЕНИЯХ БРОВКИ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ ПОСЕЛКА АРХИПО-ОСИПОВКА<br>Ионов В.Ю., Калинин Э.В., Фоменко И.К., Миронюк С.Г.                                                    |                     |     |               |   | 36-46                                                                               | 3   |
|  | ООО ПРИОБСКИЙ «НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗЫСКАНИЙ»                                                                                                                                                                   |                     |     |               |   | 47                                                                                  | 0   |
| МЕХАНИКА ГРУНТОВ                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|  | РАСЧЕТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ИХ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ<br>Тер-мартirosян Э.Г., Сидоров В.В., Нгуен Х.Х.                                                                                             |                     |     |               |   | 48-53                                                                               | 0   |
| ГЕОКРИОЛОГИЯ                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|  | МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ С ГРУНТАМИ ОСНОВАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ<br>Алексеев Е.С.                                                                                                               |                     |     |               |   | 54-59                                                                               | 0   |
| ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ                                                              |                                                                                                                                                                                                                                              |                     |     |               |   |                                                                                     |     |
|  | ВЛИЯНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ НА ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ<br>Королев В.А., Медведева С.Г.                                                                                            |                     |     |               |   | 60-74                                                                               | 1   |
|  | ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ                                                                                                                                                                                                                          |                     |     |               |   | 75                                                                                  | 0   |

# Преимущества планового хозяйства



М.И. БОГДАНОВ

Наступала весна 1937 года. В это время товарищ Сталин разработал тезис о том, что чем лучше дела у страны социализма, тем активнее ее враги. Основным докладчиком по поводу борьбы с противниками на пленуме ЦК ВКП (б) в феврале должен был стать товарищ Орджоникидзе. Но, по отзывам современников, он не разделял позицию Сталина. За пять дней до выступления на пленуме ЦК товарищ Орджоникидзе покончил с собой. Пленум блестяще прошел с 23 февраля по 5 марта 1937 года. Голосовали практически единодушно. Интересно, что пленум закончился именно 5 марта. 16 лет спустя, 5 марта 1953 года Сталин скончается. В один день с Сергеем Прокофьевым.

С нужным докладом по поводу противников выступил товарищ Ежов, в частности по поводу дела тт. Н.И.Бухарина и А.И.Рыкова. Участники пленума, следуя русской традиции не отрываться от мнения масс, объяснения Бухарина и Рыкова о необоснованности обвинений прерывали криками, расценивая их как клеветнические выпады против НКВД, партии и ЦК, и практически единогласно одобрили борьбу с врагами пролетариата — кулаками, уголовниками и всякими *прочими* антисоветскими элементами. Надо заметить, что на пленуме выступило 73 человека. Из них 56 было расстреляно уже в следующие четыре года, двое предпочло покончить жизнь самоубийством... Но на Пленуме они придерживались традиции не противоречить...

В марте 1937 был принят закон СССР о запрещении крестьянам покидать колхозы без согласия администрации и наличия подписанного трудового соглашения с будущим работодателем. А законы законопослушные граждане должны соблюдать. Таким образом было законодательно оформлено лишение крестьян права на свободу передвижения. В эти же дни появился циркуляр НКВД об усилении агентурно-оперативной работы по «церковникам и сектантам» и решение ЦК «указать НКВД на продолжающиеся случаи самоубийства заключенных в следственных тюрьмах».

В мае 1937 г. выходит директива НКВД об усилении агентурно-оперативной работы среди физкультурников. Объявляется о ликвидации ряда вредительских групп среди физкультурников, «ведших активную работу по подготовке террористических актов против руководителей ВКП (б)».

2 июня Сталин выступил на расширенном заседании Военного совета при Наркоме Обороны СССР с информацией о «военно-политическом заговоре против Советской власти, стимулировавшемся и финансировавшемся германскими фашистами». 7 июня вышло обращение Наркома обороны К.Е.Ворошилова к армии по поводу раскрытия наркоматом внутренних дел предательской, контрреволюционной, военной, фашистской организации в РККА. Уже 11 июня дело о военно-фашистском заговоре в Красной армии было рассмотрено Специальным судебным присутствием Верховного суда СССР. Восемь военачальников — М.Н.Тухачевский, И.Э.Якир, И.П.Уборевич, В.М.Примаков, В.К.Путна, А.И.Корк, Р.П.Эйдеман, Б.М.Фельдман приговорены к смертной казни и расстреляны в ту же ночь с 11 на 12 июня.

В нашей стране многое делалось впервые в мире. Еще никто, а мы уже. Самые разные вещи. Периодическая таблица Менделеева, радио Попова, паровоз отца и сына Черепановых. Это только несколько примеров из несомненно длинного списка. Первое что приходит в голову. Потом вспоминается освоение космоса, первый спутник и многое другое. Способные мы. Ничего с этим не поделаешь, да и не надо.

Еще мы чтим традиции. Традиции, память народа, проживающие через столетия, у нас удивительно живучи. Традицию зачастую можно сравнить с деревянной конструкцией, на которую надет наряд пугала. Наряд можно поменять, если обветшает, а конструкция, она, как и традиция наша, неизменна.

Среди большого списка того, что в нашей стране сделано впервые — это плановое хозяйство. Мы первые в мире показали, каких удивительных успехов может добиваться страна, если, опираясь на присущую нам четкость в исполнении поставленных задач, обязательность и инициативность, с энтузиазмом и не сомневаясь выполнять руководящие решения. Темпы индустриализации — темпы, с какими наша сельскохозяйственная страна благодаря плановому хозяйству и соблюдению российских традиций, стала к середине прошлого века одной из передовых индустриальных стран мира, до сих пор удивляют мир.

Говоря о традициях, вспоминается один из моментов нашей истории. В этом году исполняется 75 лет этому «моменту», который был растянут примерно на год. Для истории это всего лишь момент. Для тех граждан государства планового хозяйства, которых этот «момент» затронул, этот год был, наверно, бесконечен. Многих из нас тогда и на свете не было, но этот год мы помним какой-то непонятной памятью. Ощущениями, которые передавали бабушки и дедушки. Книгами. Воспоминаниями. Фильмами. Десятилетия до и десятилетия после этого момента в нашей стране тоже были не очень радужны для многих. Но этот момент был особенным.



В июле происходит сразу несколько событий, развивающих решения мартовского пленума ЦК. Начинает месяц Постановление Политбюро ЦК ВКП(б) «Об антисоветских элементах», согласно которому местным органам надо немедленно переписать всех врагов и наиболее активных из них расстрелять «в порядке административного проведения их дел». Вскоре после этого выходит Постановление Политбюро ЦК ВКП(б) «о членах семей осужденных изменников родины», согласно которому «все жены изблуженных изменников родины право-троцкистских шпионов подлежат заключению в лагеря не менее, как на 5–8 лет», а дети — помещению в детские дома и закрытые интернаты. В середине месяца открывается канал Москва-Волга, сооруженный силами заключенных Дмитлага, количество которых доходило до 192 тысяч человек. Завершил месяц Оперативный приказ НКВД СССР № 00447 «Об операции по репрессированию бывших кулаков, уголовников и других антисоветских элементов». Это было применение подходов планового хозяйства в борьбе с врагами народа. На каждую область были утверждены лимиты по «первой» и «второй» категориям. Внесение человека в список по первой категории означало немедленный арест и расстрел, внесение по второй категории предусматривало арест чуть погодя с отправкой в лагерь. Четкий график, четкое планирование — на завершение работ по приказу отведено четыре месяца. По первой категории на немедленные расстрелы было выделено лимитов на 75 950 человек, по второй на лагеря — на 193 000. Общая численность врагов по приказу составила 268 950. На местах (нельзя же подавлять инициативу) можно было переводить врагов из одной категории в другую, но превышать плановые лимиты без согласования с Москвой запрещалось. Выданных лимитов катастрофически не хватало... Вскоре после начала «операции» Ежову пришлось направить тов.Молотову письмо, в котором он просил утвердить дополнительные «лимиты» на репрессирование 63270 человек, из которых 48420 человек по первой категории. Согласовывал увеличение лимитов, поскольку дело важное, сам тов.Сталин. Плановое хозяйство.

...Россия — не Советский Союз. Мы часто это забываем, говоря и думая о своей стране. Это разные страны, разные по территории, количеству людей, социальному и национальному составу, системе управления, идеологии. Мы как будто идем по лесу около своего дачного участка, а эта часть земли уже перенесена куда-то на другую планету. Привычный лес, привычные звуки — но мы уже не здесь. Мы в другом пространстве, другом мире. Мне вспоминается эпоха расцвета инженерной геологии в нашей стране, в той, советской стране. И становится грустно, когда я вижу состояние отрасли сегодня.

Плановое хозяйство — это наша традиция. Оно, может быть, уже не совсем плановое или даже совсем неплановое. Но оно пытается им, традиционным, привычным нам казаться. Мы четко определяем, что когда должно быть сделано и зачастую дружно маршируем на месте, пытаемся продемонстрировать движение вперед.

В очередной раз изыскатели испытали «преимущества» планового хозяйства в этом году. Происходит плановое обновление изыскательской «Конституции», основного документа для изыскателей — СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения». Плановая актуализация, выполненная Национальным объединением изыскателей. По процедуре прохождения докумен-

та все соблюдено — общественное обсуждение проведено, более 1000 замечаний изыскателей изучено, получены неоднократные отрицательные отзывы Технического комитета 465 «Строительство», «владельца» вратами к нормативной базе строительной отрасли. Правда, работать по актуализированному документу нельзя — он разрушает существующую структуру нормативных документов в строительстве, которую нужно реформировать, а вовсе не выбрасывать. Но плановое хозяйство. 1 июля по утвержденному плану актуализированный СНиП должен был «выйти в массы», одобренный ТК465 и Министерством регионального развития РФ.

В июне в Министерство был передан альтернативный СНиП, подготовленный ОАО «ПНИИИС» по заказу НП СРО «АИИС». Но, в отличие от планового НОИЗовского, публичного обсуждения документа не допустили. НОИЗовский плановый. Работать по нему нельзя... ПНИИИСовский внеплановый. Работать по нему было бы можно. Посмотреть на сайте АИИС «внеплановый» документ можно, но пройти общественные слушания нельзя. Поскольку 1 июля «плановый» должны были утвердить, на обсуждение внеплановый не допустили. Но «плановый» все еще не выпущен... Казалось бы, за это время — четыре месяца, можно провести общественное обсуждение альтернативного документа. Нельзя. Традиции планового хозяйства. Почему нельзя провести публичное обсуждение двух документов, получить отзывы специалистов и принять решения? Но нельзя. Почти плановая экономика... Со всеми ее преимуществами...

А впрочем, чего я расстраиваюсь по мелочам. Ведь это всего лишь основной нормативный документ одной из отраслей. Мог бы оказаться «план по первой категории»...



#### Решение Политбюро ЦК ВКП(б) № П51/94 от 2 июля 1937 г.

##### Об антисоветских элементах

Послать секретарям обкомов, крайкомов, ЦК нацкомпартий следующую телеграмму:

«Замечено, что большая часть бывших кулаков и уголовников, высланных одно время из разных областей в северные и сибирские районы, а потом по истечении срока высылки, вернувшихся в свои области, — являются главными зачинщиками всякого рода антисоветских и диверсионных преступлений, как в колхозах и совхозах, так и на транспорте и в некоторых отраслях промышленности.

ЦК ВКП(б) предлагает всем секретарям областных и краевых организаций и всем областным, краевым и республиканским представителям НКВД взять на учет всех возвратившихся на родину кулаков и уголовников с тем, чтобы наиболее враждебные из них были немедленно **арестованы и были расстреляны в порядке административного проведения их дел через тройки**, а остальные менее активные, но все же враждебные элементы были бы переписаны и высланы в районы по указанию НКВД.

ЦК ВКП(б) предлагает в пятидневный срок представить в ЦК состав троек, а также количество подлежащих расстрелу, равно как и количество подлежащих высылке».

СЕКРЕТАРЬ ЦК И. СТАЛИН.  
(выделение шрифтом редакции)

# ИРИНА МИХАЙЛОВНА ГОРЬКОВА (1912–1999) (К СТОЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

IRINA MIKHAYLOVNA GORKOVA (1912–1999)  
(ON THE 100<sup>TH</sup> ANNIVERSARY)

**ШИБАКОВА В.С.**

Старший научный сотрудник Геологического института РАН, к.г.-м.н.,  
г. Москва, valentina-shibakova@yandex.ru

## Ключевые слова:

И.М. Горькова; Научный совет АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии; Лаборатория гидрогеологических проблем АН СССР; ПНИИИС; отдел грунтоведения; инженерная геология; дисперсные грунты; природа прочности; деформационные особенности; физико-химическая механика; физико-химические исследования; коллоидно-химические исследования; теория ползучести; реология.

**SHIBAKOVA V.S.**

A senior staff scientist of the Geological Institute of the RAS, candidate of science (Geology and Mineralogy), Moscow, valentina-shibakova@yandex.ru

## Key words:

I.M. Gorkova; Scientific Council of the AS USSR on Engineering Geology and Hydrogeology; Laboratory of Hydrogeological Problems of the AS USSR; Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction; Soil Science Department; engineering geology; dispersed soils; strength nature; deformation features; physical-chemical mechanics; physical-chemical investigations; colloidal-chemical investigations; creep theory; rheology.

## Аннотация

Данная публикация продолжает серию статей В.С. Шibaковой о Научном совете АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии и об ученых, которые были с ним связаны. Она посвящена члену Научного совета и известному ученому, доктору наук Ирине Михайловне Горьковой (1912–1999), занимавшейся физико-химическими и коллоидно-химическими исследованиями природы прочности и деформационных особенностей дисперсных грунтов и внесшей большой вклад в развитие инженерной геологии.

## Abstract

The publication continues the series of V.S. Shibakova's articles about the Scientific Council of the AS USSR on Engineering Geology and Hydrogeology and about the scientists who were associated with it. The paper is devoted to Irina Mikhailovna Gorkova (1912–1999) who was a member of the council, famous researcher, doctor of science. She dealt with physical-chemical and colloidal-chemical investigations of the strength nature of dispersed soils and their deformation features and contributed a lot to engineering geology development.



Рис. 1. Ирина Михайловна Горькова (март 1972 г.)

12 декабря 2012 г. исполняется 100 лет со дня рождения Ирины Михайловны Горьковой (рис. 1), которая принадлежит к славной плеяде ученых, внесших большой вклад в развитие инженерной геологии как фундаментальной науки (рис. 2, 3). В 1966 г. доктор наук Ирина Михайловна вошла в первый состав Научного совета АН СССР по инженерной геологии и грунтоведению как выдающийся специалист и многие годы была его членом и единственной женщиной в его составе.

Научную деятельность И.М. Горьковой можно разбить на два этапа — в составе Лаборатории гидрогеологических проблем (ЛГГП) АН СССР в 1950–1963 гг. и в составе Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя СССР в 1963–1979 гг.



В ЛГГП, созданную академиком Ф.П. Саваренским в 1944 г. для проведения фундаментальных исследований в области гидрогеологии и инженерной геологии, Ирина Михайловна пришла уже зрелым специалистом. Она к этому времени окончила докторантуру при Институте физической химии АН СССР и защитила докторскую диссертацию (в 1948 г., в возрасте 36 лет). Докторантуру И.М. Горькова проходила под руководством академика П.А. Ребиндера, основоположника нового направления в коллоидной химии — физико-химической механики.

В ЛГГП работал сильный коллектив ученых инженеров-геологов, занимавшихся проблемами инженерной геологии по трем главным направлениям — грунтоведению, региональной инженерной геологии, геодинамике. В лаборатории работали видные ученые — И.В. Попов, В.А. Приклонский, Ф.В. Котлов, Е.Г. Качугин, И.С. Рогозин, В.Н. Славянов — и много творческой молодежи.

В 1950 г. И.М. Горькова начала работать в отделе грунтоведения, возглавляемом В.А. Приклонским, и очень хорошо вписалась в коллектив. В 1950 г. в ЛГГП под руководством В.А. Приклонского было начато экспериментальное изучение природы прочности осадочных дисперсных грунтов и характера их деформационного поведения в зависимости от условий формирования и ожидаемых условий работы под сооружением на примере глинистых грунтов в районах крупного промышленного и гражданского строительства.

Все специализированные ветви инженерно-геологических исследований, выполняемые в лаборатории, имели одну цель: используя в основном геологические методы, разработать естественно-исторические научные основы для выбора и оценки участков проектируемого строительства и прогноза физико-геологических явлений, которые могут возникнуть под его воздействием. Прогнозы деформационного поведения грунтов, полученные с помощью стандартной инженерно-геологической методики, не всегда оправдывались в сложных условиях строительства, и природа возникновения инженерно-геологических явлений не была достаточно ясна и понятна. Требовались новые подходы. В развитие традиционных методов механики грунтов, применяемых в инженерной геологии, И.М. Горькова привнесла новые представления на основе результатов исследований в области физико-химической механики и коллоидной химии.

Ирина Михайловна проявила себя как блестящий экспериментатор. Тогда впервые начались систематические коллоидно-химические исследования природы прочности и деформационных особенностей осадочных дисперсных грунтов. Началась работа по внедрению лабораторных методов, развиваемых в новых разделах механики — теории ползучести и реологии, учитывающих изменения механических свойств пород во времени по мере разрушения их структурного каркаса по мере роста напряжений и освобождения замкнутой в порах воды.

И.М. Горькова понимала, что для изучения инженерно-геологических свойств осадочных пород необходимо



Рис. 2. Основные монографические работы И.М. Горьковой

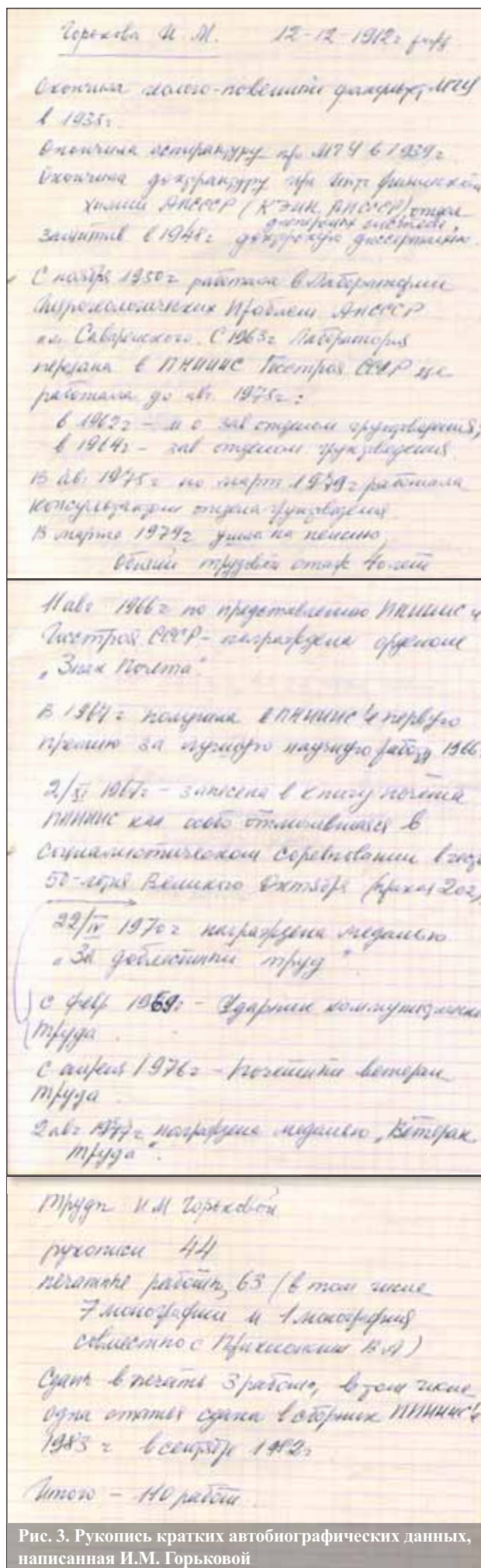


Рис. 3. Рукопись кратких автобиографических данных, написанная И.М. Горьковой

применять чувствительные и быстрые методы сравнительной оценки прочностных свойств пород и их изменений под воздействием различных факторов, поэтому она стала применять метод исследований с использованием конического пластометра, разработанный академиком П.А. Ребиндером в 1948 г. Ирина Михайловна так оценила эффективность использования этого метода: «В настоящее время конический пластометр с успехом применяется при исследованиях механических свойств консистентных смазок, цементных растворов, глинистых паст и других аналогичных систем. Его большое преимущество заключается в том, что он дает возможность быстро и легко учитывать любые относительные изменения прочности дисперсных систем (в т.ч. и глинистых грунтов с ненарушенной структурой) под влиянием того или иного фактора и получать сравнительные данные для ряда исследуемых объектов. Кроме того, конический пластометр дает сравнимые результаты и позволяет оценивать прочность систем при полутвердой консистенции, при которой обычный метод определения сопротивления сдвигу непригоден вследствие большого разброса точек и срыва испытуемых образцов».

И.М. Горькова постоянно применяла указанный метод при исследованиях и широко пропагандировала его в своих публикациях. Она писала о задачах своих исследований следующее: «При исследовании осадочных горных пород изучались свойства природных дисперсных систем в широком диапазоне концентраций с различным характером структурных связей, различными дисперсностью, химическим и минералогическим составом, как следствие, с различными прочностными и деформационными особенностями. Исследовались песчаные, песчано-коллоидные, лессовые, глинистые породы, илы, мел, мергели, органические отложения различного возраста и в широких диапазонах концентраций». Начиная с 1956 г. результаты исследований И.М. Горьковой регулярно публиковались в виде статей, монографий, тематических сборников в трудах ЛГГП АН СССР, докладах АН СССР, материалах различных тематических совещаний и др. (например [1–12, 14]). В 1956 г. вышла ее первая монография по этой теме в соавторстве с В.А. Приклонским под названием «Инженерно-геологические особенности хвалынских глинистых пород в связи с условиями их формирования (на примере некоторых районов Заволжья)». Ириной Михайловной был написан второй раздел этой работы, который содержал две статьи — «Результаты специальных структурно-механических исследований свойств хвалынских глин при помощи конического пластометра академика П.А. Ребиндера и изучение характера их взаимодействия с водой», «Структурно-механические свойства илов Черного моря и их изменение в процессе диагенеза».

В 1956 г. в Москве состоялось совещание по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения, на котором И.М. Горькова выступила с блестящим докладом «Природа легкоподвижности песчано-коллоидных пород (истинных плывунов)». Позднее на эту работу Ирины Михайловны ссылались многие исследователи, данные из нее вошли в учебники Е.М. Сергеева «Грунтоведение» и В.Д. Ломтадзе «Инженерная геология».

В 1957 г. Ирина Михайловна выступила на «Совещании по исследованию и использованию глин», про-



Рис. 4. Участники совещания по исследованию и использованию глин: первый ряд слева направо: И.В. Попов, неизвестная автору, неизвестная, А.Е. Бабинец, И.М. Горькова, В.А. Приклонский, Г.С. Дзопенидзе, Е.К. Лазаренко, М.Ф. Видулова, И.Г. Коробанова, неизвестный, Г.Г. Ильинская, неизвестная, Е.С. Дацко, неизвестная, неизвестный, Л.И. Кульчицкий (Львов, 1957 г.)

ходившем в г. Львове, с докладом «Структурообразование глин и его исследование в инженерной геологии». На этом совещании присутствовал весь цвет специалистов страны — литологи, минералоги, инженеры-геологи, гидрогеологи и др., которые имели отношение к обсуждаемым на нем проблемам (рис. 4). Доклад И.М. Горьковой имел большой успех.

В том же году в «Трудах ЛГТП АН СССР» были опубликованы три статьи И.М. Горьковой — «Закономерности изменения механических свойств глинистых пород в зависимости от влажности и структурного состояния», «Глинистые породы и их прочность в свете современных представлений коллоидной химии», «О природе плавунности песчано-коллоидных пород». В 1958 г. были опубликованы три ее статьи — «Деформационные особенности естественных и диспергационных структур некоторых глинистых пород» (в журнале «Коллоидная химия»), «Деформационные и структурные особенности некоторых глинистых пород» (в «Сборнике докладов Международного совещания по глинам в Брюсселе») и статья «Структурообразование в морских осадках» (в «Докладах АН СССР»).

В апреле 1959 г. вышел сборник «Труды ЛГТП АН СССР» под редакцией члена-корреспондента АН СССР В.А. Приклонского, однако его имя как главного редактора и автора статей было обведено траурными рамками. Виктор Александрович скоропостижно скончался 13 февраля 1959 г., едва перешагнув рубеж своего шестидесятилетия. В этом сборнике были опубликованы две статьи И.М. Горьковой — «Опыт изучения структурно-механических свойств некоторых глинистых пород» и «Структурно-механические свойства илов Черного моря и их изменения в процессе диагенеза».

В феврале 1961 г. вышла монография «Природа прочности и деформационные особенности глинистых пород в зависимости от условий формирования и увлажнения». Она была посвящена памяти Виктора Алексан-

дровича Приклонского. Эта книга явилась итогом экспериментальных работ, проводимых сотрудниками отдела грунтоведения ЛГТП с 1950 по 1959 г., и первой сводной монографией по данной проблеме в целом. В ней приведены результаты исследований современных морских илов Черного и Азовского морей, юрских глин района Курской магнитной аномалии (КМА), киевских спондиловых глин, мергелистых глин, аллювиально-лиманских отложений салехардской свиты поймы Малой Оби, хвалынских глин левобережья Ахтубы. Авторами монографии были сотрудники отдела грунтоведения ЛГТП АН СССР: И.М. Горькова, И.Г. Коробанова, Н.А. Окнина, Н.С. Реутова, И.А. Сафохина, В.Ф. Чепик. На рисунках 5, 6 представлены фотографии, сделанные в период выхода этой книги. На снимках запечатлены все сотрудники отдела во главе с его заведующей И.М. Горьковой и директором лаборатории И.В. Поповым. У всех серьезные лица, но радостные взгляды от сознания хорошо выполненной работы. На стене слева — портрет В.А. Приклонского. Через два месяца (в апреле 1961 г.) ЛГТП как структурная единица АН СССР перестанет существовать — ее передадут в Госстрой СССР.

Хотелось бы также упомянуть статью И.М. Горьковой «Природа прочности и деформационные особенности мела и некоторых мелоподобных пород», опубликованную в 1962 г., которая часто цитировалась многими исследователями.

Серьезный анализ работ Ирины Михайловны был сделан ее коллегой и соратницей И.Г. Коробановой в 2004 г. [13], которая писала: «Большой вклад в разработку проблемы прочности пород внесли фундаментальные исследования И.М. Горьковой, установившие огромную роль физико-химических процессов в формировании инженерно-геологических свойств пород. По существу, исследования И.М. Горьковой положили начало новому направлению в изучении инженерно-геологических свойств дисперсных грунтов в свете совре-



Рис. 5. Коллектив отдела грунтоведения ЛГГП АН СССР им. Ф.П. Саваренского. В первом ряду слева направо: И.Г. Коробанова, К.Н. Рябичева, И.М. Горькова, В.А. Чепик, Н.С. Реутова. В верхнем ряду слева направо: И.С. Бочарова, В.С. Быкова, А.Н. Воскресенский, Н.С. Чулкова, Н.П. Затенацкая, В.А. Мельникова, Г.Г. Зубкович, Л.И. Калинина, Н.А. Привезенцева, Н.А. Душкина (г. Москва, 1961 г.)

менных представлений и при помощи методов физико-химической механики. В соответствии с запросами инженерно-геологической практики И.М. Горьковой с коллективом сотрудников ЛГГП АН СССР исследовались лессовые и глинистые породы различного возраста и генезиса, современные илы, мел, мергели, органические отложения. Исследования показали отчетливую связь между геологическими условиями формирования и инженерно-геологическими особенностями пород. Было показано, что условия формирования пород определяют их дисперсность, химико-минеральный состав, петрографические особенности, прочность и деформационное поведение. Были выделены основные типы структурных связей в породах, а именно стабилизационные, коагуляционные, пластифицированно-коагуляционные, конденсационные. Специальные исследования дисперсных глинистых грунтов показали, что их механические свойства обусловлены структурно-текстурными особенностями, минеральным составом, составом поровых растворов, концентрацией частиц в единице объема. Было показано, что прочность и деформационное поведение глинистых пород обусловлены главным образом характером и прочностью межчастичного сцепления в местах контактов, числом и прочностью этих контактов, обуславливающих в совокупности структурно-пространственную сетку с определенными механическими свойствами. Эти свойства во многом определяются характером граничных адсорбционных и диффузионных слоев на поверхности твердых частиц. Характер же этих слоев зависит от состава и количественного соотношения взаимодействующих твердых частиц и поровых растворов... Применение методов физико-химической механики дисперсных систем в целях инженерно-геологической оценки осадочных пород позволило И.М. Горь-

ковой установить особенности естественных структур, природу диагенетических изменений современных морских илов, природу плавунности истинных плавунных различного возраста и плавунных послеледниковых глин, природу разжижения мела, легкой деформируемости некоторых мергелей, ползучести глин, природу тиксотропных превращений тонкодисперсных илов и дилатантности грубодисперсных лессов и песков, просадочности лессов... Таким образом, исследования И.М. Горьковой дали возможность вскрыть природу инженерно-геологических свойств осадочных пород и опасных для строительства инженерно-геологических процессов, таких как плавунность, просадочность, тиксотропность, ползучесть, пучение, дилатансия, пластическое течение и др.» [13].

Потеря такого крупного ученого и лидера, каким был В.А. Приклонской, тяжело отразилась на развитии инженерной геологии. После его смерти осиротевший коллектив ЛГГП им. Ф.П. Саваренского в 1961 г. в полном составе был переведен из Академии наук в Госстрой СССР. В 1963 г. лаборатория вошла в состав ПНИИИС Госстроя СССР. С этого времени начался следующий этап деятельности И.М. Горьковой. Она была утверждена заведующей отделом грунтоведения, и ей удалось сохранить полный состав его сотрудников. Тематика работ, ранее выполнявшихся в Академии наук, также была сохранена, хотя некоторые исследования, касающиеся теоретических вопросов, были свернуты. И.М. Горькова прекрасно понимала, что путь для реализации достижений инженерной геологии — результатов ее фундаментальных исследований, теоретических и методических разработок, практических приложений — это их использование для инженерных изысканий в строительстве. Поэтому Ирина Михайловна выбрала этот путь и



Рис. 6. Директор ЛГГП АН СССР им. Ф.П. Саваренского И.В. Попов (второй справа в нижнем ряду) с сотрудниками отдела грунтоведения. Заведующая отделом грунтоведения И.М. Горькова — первая справа в нижнем ряду (г. Москва, 1961 г.)

начала поиск возможностей для применения результатов своих работ в этой сфере. Она поставила себе задачу передать обширный научный материал специалистам, сделать его понятным и доступным для широкого круга читателей, особенно для профессионалов, работающих в сфере инженерно-геологических изысканий. Она продолжала свои исследования, делая акцент на практическом применении их результатов.

За время работы в ПНИИИС И.М. Горькова подготовила и опубликовала следующие шесть монографий (две из них — в соавторстве с Н.А. Душкиной, Н.А. Окниной, Н.С. Реутовой и К.Н. Рябичевой): «Природа прочности и деформационные особенности лессовых пород» (1964 г.); «Структурные и деформационные особенности осадочных пород различной степени уплотнения» (1965 г.); «Теоретические основы оценки осадочных пород в инженерно-геологических целях» (1969 г.); «Комплексная оценка инженерно-геологических свойств глинистых и лессовых пород» (1969 г.); «Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях» (1975 г.). Рассмотрение этих монографий вполне может быть предметом обсуждения на отдельном симпозиуме. Приведем лишь некоторые выдержки из них.

В монографии «Теоретические основы оценки осадочных пород в инженерно-геологических целях» [4] И.М. Горькова пишет: «Инженерно-геологические изыскания должны проводиться по наиболее сжатой программе. Основой изысканий является тщательное изучение геологических и гидрогеологических условий местности, оценка инженерно-геологических процессов и явлений, их приуроченность к отдельным разностям пород, наблюдение пород в массиве, откосах, обнажениях, в кернах и характеристика их трещиноватости, слоистости, выветрелости, неоднородности, наличие включений и прочих особенностей. Классификация

пород, распространенных в данной местности, производится при помощи обязательного комплекса основных классификационных показателей, определяемых для всех встреченных разностей при помощи простейших полевых и лабораторных методов исследований.

Мы рекомендуем следующий единый и обязательный комплекс классификационных показателей для осадочных пород:

- плотность пород,  $\text{г/см}^3$  (объемный вес влажной породы и объемный вес скелета);
- влажность пород (или водонасыщенность для пылеватых и песчаных разностей);
- прочность пород (сопротивление одноосному сжатию,  $\text{кг/см}^2$ , внедрению конуса или штампа, пенетрации);
- дисперсность пород (гранулометрический состав определяется после тщательного растирания навески породы с раствором пирофосфата натрия);
- коэффициент агрегированности пород...

В указанной работе в таблицах 1 и 5 приводятся детальные схемы зависимости деформационных особенностей пород от комплекса классификационных показателей, с которыми может ознакомиться заинтересованный читатель.

Далее И.М. Горькова пишет: «...Мы рекомендуем в пределах установленных таким образом классификационных групп при помощи некоторых дополнительных, также очень простых и быстрых, методов количественно характеризовать присущие данной группе особенности пород (на примере типичных образцов): их высокую чувствительность при нарушении структуры, резкое увеличение деформируемости при увлажнении, набухании. Это дает возможность провести более детальную оценку отдельных разностей изучаемых пород по их основным, наиболее важным в инженерно-геологическом отношении свойствам. Более сложные специ-

альные исследования должны производиться в тех случаях, когда полученный объем информации недостаточен для проектирования. Но и в этом случае мы рекомендуем определенный комплекс исследований для пород отдельных классификационных групп применительно к их отличительным особенностям. Это позволит избежать затрат на производство ненужных анализов и определений, сэкономить время, дать более обоснованные характеристики пород для проектирования и обеспечить достоверный прогноз поведения пород при строительстве и эксплуатации сооружений. Схемы испытаний всегда должны определяться задачами исследований, особенностями пород и ожидаемыми условиями деформирования при строительстве. Реологические методы исследования пород и методы физико-химической механики являются значительно более перспективным, но использование получаемых этими методами характеристик пород в инженерно-геологической практике затруднено отсутствием новых расчетных схем. Поэтому важнейшей задачей современной инженерной геологии является разработка и усовершенствование новых методов исследований пород и создание расчетных схем, основанных не на старых расчетных показателях, а на реологических характеристиках пород, ибо только новые расчетные схемы могут дать удовлетворительное количественное описание деформационного поведения пород в заданных условиях» [4].

Анализируя обширнейший экспериментальный материал, касающийся влияния плотности, влажности, прочности, дисперсности и структурных связей грунтов на их механические характеристики, И.М. Горькова делает заключения о механизмах многих процессов — просадочности, ползучести, текучести, тиксотропности и др. Такие выводы делаются в простой и доступной для широкого круга специалистов форме. Приведем три примера.

1. «Просадки в породах, в том числе в лессовых, есть результат быстро протекающей формации хрупкого разрушения под воздействием мгновенного приложенного усилия, непременно превышающего их предел прочности. Чем меньше прочность пород, тем при меньших напряжениях возникают просадки. Поэтому они, как правило, приурочены к слабо уплотненным и слабо литифицированным разностям осадочных пород. Просадки в лессах при естественной влажности являются при нагрузках свыше  $6\text{--}8\text{ кг/см}^2$ . Увлажнение лессовых пород ведет к резкому снижению их прочности. В этих условиях нагрузки порядка  $0,5\text{--}1,5\text{ кг/см}^2$  уже намного превышают предел их прочности и неизбежно обуславливают просадку. Совершенно аналогично мерзлые покровные суглинки весьма прочны и легко выдерживают нагрузки от сооружений. Но при оттаивании их предел прочности резко снижается и существующие нагрузки вызывают просадки.

Таким образом, способность лессовых пород к просадкам определяется в совокупности прочностными свойствами пород, величинами прилагаемых нагрузок и скоростью их приложения» [7].

2. Анализируя экспериментальные данные о деформациях ползучести, Ирина Михайловна пишет: «Такие деформации могут наблюдаться в глинах с естественной структурой при преобладании обратимых, чаще стабилизационных, структурных связей. При медленном тече-

нии нарушаемое сцепление между одними частицами сразу же восстанавливается между другими, и таким образом все течение протекает без нарушения структуры и сплошности образца в целом, так как скорости нарушения и восстановления равны. Естественно, что подобная ползучесть наблюдается главным образом в коренных глинистых породах, достаточно плотных, чья структура способствует подобным деформациям. Примером могут служить юрские глины района Обояни КМА, некоторые выветрелые глины Ульяновского Поволжья и др.» [5].

3. «Рассмотрим свойства пльвунов, текучих поруд-грунтов, лишенных сцепления и не имеющих внутреннего трения в разжиженном состоянии. Нами изучены так называемые истинные пльвуны, или, как мы их часто называем, песчано-коллоидные породы, содержащие от 3 до 12% дисперсных составляющих и пльвунные глины. Те и другие породы отличаются наличием устойчивых адсорбционных слоев органического вещества, являющегося стабилизатором частиц и препятствующего их сцеплению и трению. Породы, в которых при разрушении структуры происходит падение вязкости на несколько десятичных порядков, называются в международной литературе пльвунными (quick), т.е. внезапно разжижающимися и легкоподвижными. Способность пльвунных пород к внезапному оплыванию (разжижению) и течению как жидкость при нарушении их структуры является причиной многочисленных аварий, обрушений и вытеканий грунта в шахтах, откосах, затоплений котлованов, погружений в грунт поездов, насыпей, домов, людей и скота при неумелом инженерном воздействии или при неправильной строительной оценке пород... Наши исследования показали, что во влажном ненапряженном состоянии истинные пльвуны достаточно плотно сложены, но весьма подвижны. Присутствие устойчиво стабилизированных глинистых и коллоидных частиц создает им характерную для этого состояния породы структуру. Основную, определяющую, роль в ней играет стабилизированная дисперсная масса, изолирующая друг от друга песчаные зерна, которые в данном случае являются лишь инертным наполнением. Деформационное и реологическое поведение пльвунов в таком состоянии в области малых напряжений сдвига или после динамического воздействия определяется в основном способностью этой массы со взвешенными в ней зернами песка к истинному течению при напряжениях выше сопротивления внедрению конуса с очень малой вязкостью (до  $3\text{ Па}\cdot\text{с}$ )» [5].

В своей последней монографии «Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях» И.М. Горькова сформулировала основные научные результаты проведенных исследований следующим образом: «Подтвердилась отчетливая связь между геологическими условиями образования пород, их дальнейшим формированием, условиями залегания, гидрогеологическими и геохимическими условиями окружающей среды и инженерно-геологическими особенностями пород. Физико-химическая механика выявила зависимость прочностных, деформационных и реологических свойств грунтов от их состава, состояния, типа структурных связей, величины действующего напряжения и режима деформирования. Эта зависимость является основным законом грунтоведения. Физико-химическая механика осадочных пород позволила:



Рис. 7. И.М. Горькова в день своего 60-летия среди сотрудников, аспирантов, учеников, гостей. Нижний ряд слева направо: В.А. Чепик, неизвестный автору аспирант из Украины, Н.Г. Иножарская, В.А. Мельникова, И.М. Горькова, И.Я. Богданов. Верхний ряд слева направо: Н.А. Душкина, неизвестный автору сотрудник ПНИИС, Д.Б. Саркисян (г. Москва, ПНИИС, 1972 г.)

- установить связь между их составом и состоянием (т.е. геолого-генетическими особенностями) и их механическими и реологическими свойствами и, следовательно, получить возможность обоснованного прогноза поведения пород при взаимодействии с сооружением;
- выявить природу прочности отдельных наиболее распространенных типов осадочных пород, природу основных инженерно-геологических явлений, присущих этим грунтам в определенных условиях деформирования, таких как плывуность, разжижение при динамическом воздействии, тиксотропия, просадочность, пластическое течение, дилатансия и др.;
- создать новую научно обоснованную классификацию осадочных пород, в которой по совокупности прямых количественных классификационных показателей — дисперсности, характера структурных связей, плотности, влажности и прочности пород — можно определить их реологическое и деформационное поведение, механизм присущих им инженерно-геологических явлений при заданном режим деформирования.

Эта классификация является основой инженерно-геологического прогноза и комплексной оценки пород, а также региональной методики их исследования. Имеющийся фактический материал позволил нам составить разделы комплексной инженерно-геологической классификации для глинистых и лессовых пород, являющихся наиболее распространенными и сложными дисперсными и дисперсно-обломочными породами. Эти классификации дают возможность оценить строительные свойства пород по комплексу простых, легко определяемых свойств» [5].

Отошлем заинтересованных читателей к этим двум классификациям — «Комплексной классификации глинистых водонасыщенных грунтов в строительных целях» и «Комплексной классификации лессовых и лессовидных пород» [5]. Они как бы венчают результаты деятельности И.М. Горьковой. Следует отметить, что Ирина Михайловна в монографии [5] также рекомендовала при проведении работ составлять паспорта дисперсных осадочных пород и предложила образец классификационного паспорта породы. С помощью паспортов можно классифицировать породы по специфическим деформационным особенностям и в дальнейшем выделять классификационные группы пород, отличающиеся особыми инженерно-строительными свойствами.

И.М. Горькова руководила довольно большим коллективом сотрудников и аспирантов отдела грунтоведения ПНИИС многие годы. В этом коллективе была создана доброжелательная и творческая атмосфера (рис. 7). Все в нем были энтузиастами своего дела, объединенными общими интересами науки. Работы отдела проводились в тесном контакте со многими научными и производственными организациями, что давало возможность кооперироваться, быстро и своевременно отбирать образцы грунтов в различных регионах страны, применять новые приборы и методы исследований. Перечислим лишь некоторые из этих организаций: Институт коллоидной химии, Институт океанологии, Геологический институт, Московский государственный университет, Институт «Гидропроект», ЦНИИС, Метрогипротранс, Гипрокоммунводхоз, Ленгипротранс, Ленгидеп и др.

В отделе грунтоведения царил атмосфера творческого общения. Для консультаций и обсуждения про-

блем в лабораторию приезжали многие специалисты. И.М. Горькова щедро делилась своими знаниями и опытом — учила, помогала, консультировала. Под ее научным руководством было защищено большое количество кандидатских диссертаций. Многие ее ученики стали известными специалистами и работали в различных организациях — А.Л. Монюшко, А.Л. Рубинштейн, Н.П. Затеницкая, Н.С. Реутова, И.Я. Богданов, Д.Б. Саркисян, О.Г. Гунашян, Н.А. Платов, Н.Г. Иножарская и др.

Ирина Михайловна обладала большим авторитетом и пользовалась уважением в научных кругах. Сам факт ее присутствия на заседаниях Научного совета АН СССР по инженерной геологии и грунтоведению создавал, как казалось автору этой статьи, особую атмосферу, стоит вспомнить, с каким вниманием к ней подходили поздравиться почтенные члены Научного совета — Н.Н. Маслов, Н.В. Коломенский, А.А. Кудрявцев, Л.Д. Белый, М.В. Чуринов, В.Д. Ломтадзе, Н.А. Цытович, И.В. Попов и др.

И.М. Горькова свободно владела английским языком и была хорошо знакома с зарубежными научными исследованиями. В настоящее время это кажется обычным, но в 1960–1970-е гг. это было большой редкостью.

Вот как вспоминает эту светлую личность И.Г. Коробанова: «Ирина Михайловна Горькова запомнилась как великая труженица и большой энтузиаст своего дела. Она великолепно, артистически, с вдохновением, без всякого конспекта выступала с докладами на совещаниях, конференциях и ученых советах. В тесной маленькой лаборатории в Старомонетном переулке, в помещении, где было полно сотрудников и достаточно шумно, И.М. Горькова писала очередную из своих многочисленных монографий и статей. Запомнился ее восторг при удачном завершении эксперимента, когда она от переполнявших ее чувств начинала петь и в сопровождении своих сотрудников кружиться вокруг лабораторного стола» [13].

Ирина Михайловна была скромным человеком, она никогда не выступала на заседаниях Научного совета по вопросам, не затрагивавшим ее научных интересов. При этом, несмотря на формальные до этого отношения, И.М. Горькова в перерыве заседания как-то подошла к автору этих строк и дала дружеский совет личного характера, который впоследствии очень пригодился в работе.

Хотелось бы отметить еще одну черту характера И.М. Горьковой, которая стала для автора очевидной после знакомства с ее публикациями. Ирина Михайловна неустанно соблюдала авторские права своих сотрудников — все они обычно являлись ее соавторами в написанных ею статьях и монографиях, для нее не было понятия «технический исполнитель работ». И.М. Горькова также весьма ответственно относилась к цитированию других авторов, ее публикации включали обширные библиографические списки по рассматриваемым вопросам.

Научная деятельность Ирины Михайловны Горьковой является яркой страницей в истории инженерной геологии. Автор надеется, что ее научное наследие будет востребовано последующими поколениями инженеров-геологов.

*Автор выражает искреннюю благодарность Нине Андреевне Душкиной, сотруднице и верной помощнице И.М. Горьковой, которая любезно предоставила автору рукопись, фотографии и научные работы, использованные в статье.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горькова И.М. Деформационные особенности осадочных пород разной степени литификации как основа прогноза инженерно-геологических процессов // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1963. Т. 43. С. 33–54.
2. Горькова И.М. Закономерности изменения механических свойств глинистых пород в зависимости от влажности и структурного состояния // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1957. Т. 14. С. 222–232.
3. Горькова И.М. Структурообразование в морских осадках // Доклады АН СССР. 1958. Т. 123. № 2. С. 343–345.
4. Горькова И.М. Теоретические основы оценки осадочных пород в инженерно-геологических целях. М.: Наука, 1969. 136 с.
5. Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.
6. Горькова И.М., Душкина Н.А., Окнина Н.А., Рябичева К.Н., Чепик В.Ф. Природа плавунности послеледниковых морских глин Прибалтийского низменности КАСССР // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1963. Т. 44. С. 22–133.
7. Горькова И.М., Окнина Н.А., Душкина Н.А., Рябичева К.Н. Природа прочности и деформационные особенности лессовых пород. М.: Наука, 1964. С. 148.
8. Горькова И.М., Душкина Н.А., Рябичева К.Н. Структурно-механические свойства илов Черного моря и их изменение в процессе диагенеза (предварительное сообщение) // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1958. Т. 23. С. 55–69.
9. Горькова И.М., Душкина Н.А., Окнина Н.А. и др. Природа прочности мела и некоторых мелоподобных пород // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1962. Т. 44. С. 53–60.
10. Горькова И.М., Коробанова И.Г., Окнина Н.А. и др. Природа прочности и деформационные особенности глинистых пород в зависимости от условий формирования и увлажнения // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1961. Т. 29. 155 с.
11. Горькова И.М., Реутова Н.С., Душкина Н.А., Рябичева К.Н. и др. Комплексная оценка инженерно-геологических свойств глинистых и лессовых пород. М.: Наука, 1969. 120 с.
12. Горькова И.М., Чепик В.Ф., Рябичева К.Н. О природе плавунности песчано-коллоидных пород // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1957. Т. 15. С. 62–152.
13. Коробанова И.Г. Инженерно-геологическое изучение горных пород в Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР. М.: Изд-во МГУ, 2004. 35 с.
14. Приклонский В.А., Горькова И.М., Окнина Н.А., В.Ф. Чепик. Инженерно-геологические особенности хвалынского глинистых пород в связи с условиями их формирования // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. 1956. Т. 13. 151 с.



# ИРИНА МИХАЙЛОВНА ГОРЬКОВА (1912–1999) — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ В ОБЛАСТИ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ (К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

## IRINA MIKHAYLOVNA GORKOVA (1912–1999) — AN OUTSTANDING SCIENTIST IN THE FIELD OF ENGINEERING GEOLOGY (ON THE 100<sup>TH</sup> ANNIVERSARY)

**ПЛАТОВ Н.А., ПОТАПОВ А.Д., ЛАВРУСЕВИЧ А.А.**

Московский государственный строительный университет, г. Москва,  
lavrusevich@yandex.ru

**КОРОБАНОВА Н.Г., ЛАВРОВА Н.А., КЛИНОВА Г.И.,  
БАСИНСКАЯ Е.В., КРОТОВА А.В.**

ОАО «ПНИИИС», г. Москва

**PLATOV N.A., POTAPOV A.D., LAVRUSEVICH A.A.**

Moscow State Construction University, Moscow,  
lavrusevich@yandex.ru

**KOROBANOVA N.G., LAVROVA N.A., KLIKOVA G.I.,  
BASINSKAYA E.V., KROTOVA A.V.**

OAO «PNIIS», Moscow

Ирина Михайловна Горькова, один из выдающихся ученых в области инженерной геологии, родилась в декабре 1912 года в г. Астрахани в семье банковского служащего. Она окончила женский колледж в г. Лондоне, затем Колумбийский университет в США, а после этого — биолого-почвенный факультет Московского государственного университета в СССР.

В 1948 году под руководством академика П.А. Ребиндера И.М. Горькова защитила докторскую диссертацию. Работала она в Лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, а затем — в ПНИИИС Госстроя, где под ее началом на основе нового направления в коллоидной химии дисперсных систем, развиваемого академиком П.А. Ребиндером, возникла самостоятельная ветвь исследований в инженерной геологии — физико-химическая механика осадочных пород.

В отличие от механики грунтов физико-химическая механика осадочных пород, как отмечала И.М. Горькова, уделяет внимание всем особенностям состава, структуры, деформационного, прочностного и реологического поведения природных дисперсных систем «грунтов» с обязательным учетом геохимической среды их формирования. Это учение, последовательно развивающееся на базе геолого-генетического направления, устанавливает четко выраженную количественную и качественную зависимость между геолого-генетическими особенностями пород и их механическими и реологическими свойствами, определяющими в совокупности их инженерно-геологические проявления в заданных условиях.

И.М. Горькова показала, что физико-химическая механика дала возможность получения обоснованного количественного прогноза поведения пород (грунтов) при взаимодействии с сооружением. Она доказала, что, если переменные величины вышеуказанной сложной функциональной зависимости, относящиеся к геолого-генетической характеристике грунтов (дисперсности, минеральному и химическому составу, типу структурных связей, плотности, влажности, прочности и др.), достаточно хорошо изучены и в большинстве случаев могут быть количественно охарактеризованы прямыми классификационными показателями либо непосредственно в поле, либо в лаборатории, то их деформационные, прочностные и реологические свойства при заданных режимах деформирования при статическом и динамическом воздействии, при различном характере напряженного состояния в образцах и в массиве до настоящего времени изучены совершенно недостаточно, нецеленаправленно и в отрыве от природы грунта.

В течение всей своей научной деятельности И.М. Горькова указывала на необходимость сосредоточения научных сил и материальных ресурсов на решении основных проблем инженерной геологии как науки, имеющей большое практическое значение.

К числу первоочередных, на взгляд Ирины Михайловны, относились следующие теоретические проблемы инженерной геологии:

- 1) установление закономерностей формирования инженерно-геологических свойств грунтов в процессе литогенеза и гипергенеза в различных геологических, геохимических и физико-географических условиях;
- 2) дальнейшее развитие физико-химической механики грунтов и установление количественных зависимостей между геолого-генетическими особенностями отложений и их прочностными, деформационными и реологическими характеристиками как основы инженерно-геологической классификации грунтов;
- 3) установление закономерностей изменений механических свойств грунтов различных классификационных групп в зависимости от режима приложения нагрузок;
- 4) разработка методов количественного прогноза инженерно-геологических процессов и явлений в грунтах различного состава и состояния в зависимости от напряженного состояния массива и характера инженерного воздействия;
- 5) разработка новых расчетных схем устойчивости грунтов с учетом их состава, состояния, структурных, деформационных, прочностных и реологических особенностей.

И.М. Горькова последовательно и гениально развивала геолого-генетическое направление в инженерной геологии, уделяя основное внимание закономерностям формирования инженерно-геологических свойств горных пород в зависимости от условий осадконакопления, последующего литогенеза и типа структурных связей (капиллярных, коагуляционных, пластифицированных, цементационных, кристаллизационных и смешанных). Развитие этого направления сыграло положительную роль в создании теоретических основ инженерной геологии.

Ирина Михайловна постоянно сотрудничала с известными учеными — И.В. Поповым, Н.Н. Масловым, Н.А. Цытовичем, С.С. Морозовым, Е.М. Сергеевым, Л.Д. Белым, В.И. Ферронским, В.А. Приклонским и др. Она написала множество научных трудов, которые нашли применение как в нашей стране, так и за рубежом. И.М. Горькова воспитала несколько поколений специалистов в инженерной геологии, которые с благодарностью вспоминают своего учителя. 📖

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ

## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL EXPERIMENTAL RESEARCH ASPECTS OF SANDY-CLAYEY FILLING AGGREGATE COMPOSITION AND PROPERTIES OF COARSE-GRAINED SOILS

**БАБЕНКО В.А.**

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии  
геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
vababenko@bk.ru

**НИКИФОРОВ Н.В.**

Магистрант кафедры инженерной и экологической геологии  
геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,  
nikiforovnv@gmail.com

**ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А.**

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии  
геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д. г.-м. н.,  
eugene@geol.msu.ru

**BABENKO V.A.**

Department of engineering and ecological geology, faculty of the geology  
of Lomonosov Moscow State University, postgraduate student,  
vababenko@bkl.ru

**NIKIFOROV N.V.**

Department of engineering and ecological geology, faculty of the geology  
of Lomonosov Moscow State University, graduate student,  
nikiforovnv@gmail.com

**VOZNESENSKY E.A.**

Department of engineering and ecological geology, faculty of the geology  
of Lomonosov Moscow State University, doctor of science (Geology and  
Mineralogy), professor, eugene@geol.msu.ru

### Ключевые слова:

крупнообломочный грунт; заполнитель; мелкозём; плотность;  
динамическое уплотнение; оптимальная влажность;  
прочностные свойства; деформационные свойства.

### Key words:

coarse-grained soil; filling aggregate; fine earth; density; dynamic  
compaction; optimum moisture content; strength properties;  
deformation properties.

### Аннотация

В статье обобщены имеющиеся сведения об исследовании состава и свойств крупнообломочных грунтов и их классифицирования. Приводятся результаты лабораторных исследований щебнистых грунтов с песчано-пылеватым заполнителем оползневых и делювиально-оползневых отложений Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа. Предлагается методика определения физико-механических свойств заполнителя как составной части крупнообломочного грунта в целом на основе расчетного значения плотности заполнителя для приготовления образцов с заданными плотностью и влажностью.

### Введение

На протяжении последних 40 лет крупнообломочные породы были объектом тщательного инженерно-геологического изучения. Надежное определение свойств этих грунтов имеет большое значение, в частности, при строительстве и реконструкции автомобильных дорог и удерживающих сооружений на них в пределах горных территорий, где они имеют широкое распространение среди склоновых гравитационных отложений, непосредственно взаимодействующих с сооружениями. Осуществление экономически эффективных и надежных проектных решений сооружений автомобильных дорог в таких районах невозможно без глубокого изучения физических и физико-механических свойств крупнообломочных грунтов, которые, в частности, во многом определяют давление склоновых отложений на подпорные сооружения и их устойчивость, что в конечном счете сказывается на работоспособности дороги и сроке ее службы.

С другой стороны, использование крупнообломочных грунтов при строительстве земляных сооружений также требует комплексного изучения этого материала. Присутствие в таких грунтах песчано-глинистого заполнителя, как показано рядом авторов (В.И. Федоровым, А.А. Васильевой, Г.Л. Ткаченко, В.Л. Лебедевым, Ю.К. Зарецким, Э.И. Воронцовым, В.И. Вуцелем, М.П. Павничем, С.Б. Уховым, А.В. Конвизом, В.В. Семеновым и др.), резко сказывается на свойствах породы, а при значительном содержании заполнителя его физико-механические свойства определяют и свойства грунта в

### Abstract

The paper summarizes the available information on research of composition and properties of coarse-grained soils and their classification. Laboratory test results of crushed-stone soils with sand-silt filling aggregates of landslide and diluvium and landslide deposits of the Northwest Caucasian Black Sea Coast are presented. A determination technique of physical-mechanical properties of the filling aggregate as a constituent part of the coarse-grained soil in whole on the base of the calculated filling aggregate density value to prepare soil samples having specified density and moisture is proposed.



целом. При этом наблюдается зависимость соответствующих показателей от степени уплотнения и консистенции заполнителя.

Это ставит конкретные методические задачи определения физико-механических свойств заполнителя для выявления основных факторов, влияющих на свойства грунтов в целом. Нормативные документы, регламентирующие методы экспериментального определения свойств грунтов, в большинстве случаев (особенно для лабораторных методов) либо не распространяются на такие грунты, либо имеют существенные ограничения по размеру и содержанию крупных обломков.

В связи с этим разработка корректной методики определения физических и физико-механических свойств заполнителя крупнообломочных грунтов в лабораторных условиях является актуальной задачей грунтоведения и имеет существенное практическое значение для строительства автомобильных дорог в горных районах.

Целью данной работы являлось изучение состава и свойств песчано-глинистого заполнителя крупнообломочных грунтов. Для реализации указанной цели были поставлены следующие задачи:

- обзор современного состояния вопроса исследования крупнообломочных грунтов как двухкомпонентной системы;
- изучение основных физических и физико-химических свойств песчано-глинистого заполнителя;
- теоретическое обоснование разработанной методики получения искомой плотности заполнителя крупнообломочного грунта в зависимости от влажности и затрачиваемой работы на уплотнение.

В настоящей статье обобщен опыт исследований состава и свойств крупнообломочных грунтов и их классифицирования, а также описывается разработанная авторами методика определения физико-механических свойств заполнителя как составной части крупнообломочного грунта в целом. Эта методика основана, во-первых, на расчете плотности заполнителя в условиях природного залегания грунта по ряду экспериментально определяемых (в полевых и лабораторных условиях) показателей, а во-вторых, на создании образцов с расчетной плотностью при известной естественной влажности заполнителя для последующего определения его прочностных и деформационных характеристик при стандартных лабораторных испытаниях.

### **Опыт изучения крупнообломочных грунтов как двухкомпонентных систем**

#### ***Изученность вопроса***

Крупнообломочные грунты имеют различный генезис и, как правило, обладают достаточно высокой прочностью и малой деформируемостью при внешних нагрузках, в связи с чем являются обычно надежными основаниями инженерных сооружений. Они также с успехом используются как строительный материал в различных элементах земляных сооружений.

Под крупнообломочными принято понимать грунты, состоящие из окатанных или угловатых обломков горных пород размером более 2 мм, имеющих преимущественно полиминеральный состав и составляющих более 50% массы воздушно-сухого грунта [9]. Их наиболее

подробное определение дано в методическом руководстве [15]: «Крупнообломочные грунты, представляющие собой несцементированные продукты искусственного или естественного смешения исходных горных пород различного генезиса и минералогического состава и отличающиеся повышенным (более 10%) содержанием обломочных (скелетных) частиц крупнее 2 мм, делятся на три класса в соответствии с классификацией СоюзДорНИИ».

Заполнитель представляет собой продукт разрушения исходных пород, в том числе самих обломков. Поэтому представление о дисперсном заполнителе крупнообломочных пород формировалось по мере изучения подобных грунтов как сложных двухкомпонентных систем — обломков и заполнителя.

Изучение связи физико-механических свойств крупнообломочных грунтов с их гранулометрическим составом начиная с 30-х гг. прошлого века велось в Дорожном научно-исследовательском институте (ДорНИИ). В отличие от подобных работ других исследователей того же времени как в нашей стране, так и за рубежом, исследования ДорНИИ были ориентированы на испытания не естественных весьма различных по гранулометрическому составу грунтов, а искусственных смесей разных фракций. В результате этих работ были получены зависимости физико-механических свойств грунтов от крупности частиц и отчасти от петрографического состава крупных фракций.

С середины XX века начались систематические научные исследования инженерно-геологических особенностей крупнообломочных грунтов. Впервые такая задача была поставлена Н.В. Коломенским. В 1964–1969 гг. в связи с комплексной селевой съемкой масштаба 1:10 000 районов Туапсе и Новороссийска на Лазаревской геотехстанции Днепропетровского института инженеров транспорта (ДИИТ) велось изучение крупнообломочных пород под научным руководством М.Н. Гольдштейна и Е.А. Толстых. С начала 1950-х гг. большие исследования крупнообломочных грунтов как части элювия проводились уральской группой исследователей (Л.И. Корженко, Н.А. Цилуриком, В.Б. Швецем, Г.Б. Кульчицким и др.). В 1955–1956 гг. А.И. Шеко на примере Гурзуфского оползневого массива было проведено изучение крупнообломочных пород, результаты которого стали одними из основополагающих для современных представлений об особенностях таких грунтов.

Физико-механические свойства естественных образцов и искусственных смесей с крупнообломочным материалом и заполнителем изучались в институтах ВОДГЕО, ГИДРОПРОЕКТ, ТНИСГЭИ, ВНИИГ, ДальНИИС (А.А. Ничипоровичем, Я. Журеком, С.М. Атайя, А.И. Тейтельбаумом, Л.А. Авакяном, Г.Н. Петровым, В.А. Дубняком, В.Г. Радченко, В.И. Федоровым и др.). Влияние природных факторов на механические свойства крупнообломочных грунтов изучалось многими исследователями на модельных смесях (Р.Г. Тулиновым, Л.Н. Рассказовым, О.А. Пахомовым, Р.Г. Кальберговым и др.).

Для щебнисто-глинистых и галечно-глинистых пород Черноморского побережья Кавказа В.П. Вихаревым на разработанной им стендовой срезной установке были выполнены методические опыты по оценке влия-

Таблица 1

| Классификация крупнообломочных грунтов по гранулометрическому составу (по Г.Н. Петрову [17]) |                                                                |                              |                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид грунта                                                                                   | Соответствующий вид грунта при преобладании неокатанных частиц | Более 50% частиц крупнее, мм | Примечание                                                                                                                                                                           |
| Валунный                                                                                     | Глыбовый                                                       | 200                          | При содержании песчаного заполнителя более 40% или пылеватого и глинистого заполнителя более 30% в наименовании крупнообломочного грунта должно содержаться наименование заполнителя |
| Галечниковый                                                                                 | Щебнистый                                                      | 10                           |                                                                                                                                                                                      |
| Гравийный                                                                                    | Дресвяный                                                      | 2                            |                                                                                                                                                                                      |

ния содержания обломков на сопротивление грунтов сдвигу. Наиболее детальные исследования поведения крупнообломочных грунтов с различными видами заполнителей и различным содержанием крупных обломков были выполнены Д.П. Прочухеном, А.Н. Лужецким, В.Г. Мельником, Н.Я. Холитовым, Э.М. Добровым и др. Изучению различных свойств крупнообломочных грунтов посвящены также работы А.К. Ларионова, А.А. Васильева и ряда других авторов.

С.Б. Уховым с соавторами [24] был предложен новый метод определения механических свойств неоднородных крупнообломочных грунтов, основанный на математическом моделировании эксперимента.

Сегодня особое внимание уделяется изучению крупнообломочных грунтов при гидротехническом строительстве, а также для совершенствования геотехнотроля при работе с ними [1–3].

Исследования крупнообломочных пород как материала для строительства грунтовых плотин является одним из направлений работы Научно-исследовательского института энергетических сооружений (ОАО «НИИЭС»). Их основная задача — изучение свойств двухкомпонентных смесей, крупнообломочных грунтов и глинистого заполнителя. С.В. Борткевичем была разработана методика проектирования параметров уплотнения и оперативные методы контроля качества уплотнения таких смесей [3].

Все эти исследования позволили существенно расширить представления об инженерно-геологических особенностях крупнообломочных грунтов.

#### Классифицирование крупнообломочных грунтов

К сегодняшнему дню в нашей стране разработан целый ряд классификаций крупнообломочных грунтов, например:

1) по размеру частиц (классификации Н.В. Логвиненко, Московского нефтяного института, Г.И. Ершовой, Л.Б. Рухина, П.Л. Безрукова и А.П. Лисицына);

2) инженерно-геологических (классификации В.В. Охотина, Е.М. Сергеева и др., ЦНИИ автодорожного транспорта, В.А. Приклонского, П.Н. Панюкова, Г.Л. Фисенко, Н.Н. Маслова)<sup>1</sup>;

3) представляющих исторический интерес (классификации В.Р. Вильямса, А.Н. Сабанина).

Зарубежные классификации также достаточно разнообразны, например классификации Й. Грубецкого и Й. Сысака (Польша, 1960), К. Кайля (Германия, 1951), К.К. Вентворта (США, 1929), Р.В. Симонсона (США, 1989), К.П. Леонарда и К.В. Фишера (Великобритания, 1969).

В практике инженерно-геологических исследований известно несколько классификаций крупнообломочных грунтов по гранулометрическому составу. Проектно-изыскательскими организациями широко применяется классификация ГОСТ 25100-95 [6] и Иванова Н.Н. — СП 35.13330.2011 [20]. Согласно последней при подразделении элювиальных крупнообломочных грунтов по гранулометрическому составу на разновидности необходимо дополнительно указывать содержание частиц заполнителя размером менее 0,1 мм, а также выделять щебенисто-дресвяные грунты при содержании частиц мельче 0,1 мм до 10% по массе, а крупнее 10 мм — более 25%.

В свою очередь, структурные элементы грунтов подразделяют по размеру на четыре группы [13]:

- 1) крупнообломочные (обломки крупнее 2 мм);
- 2) среднеобломочные (зерна от 2 до 1 мм);
- 3) мелкообломочные (зерна от 1,00 до 0,01 мм);
- 4) тонкообломочные (частицы менее 0,01 мм).

В классификации грунтов земляного полотна крупнообломочные грунты подразделяют на три группы (табл. 1):

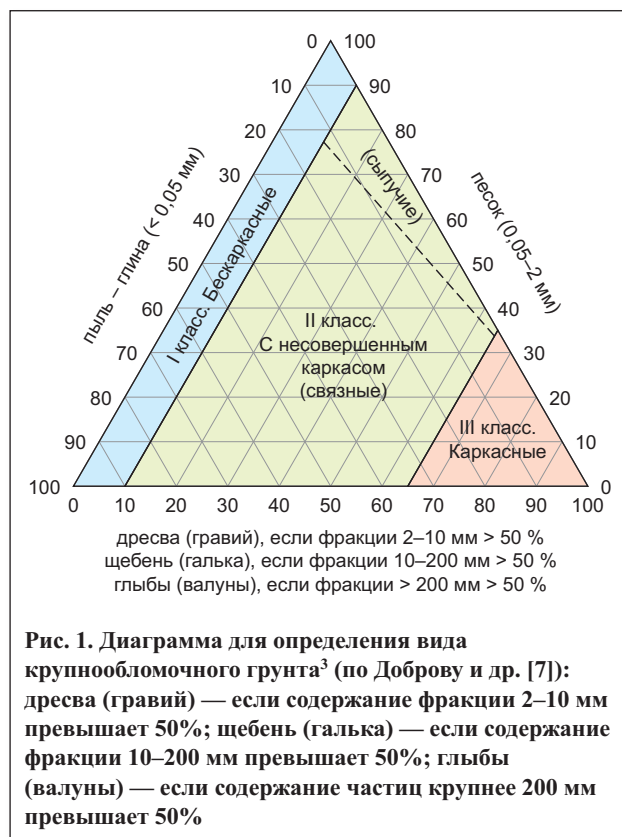
- 2) глыбовые или валунные;
- 3) щебнистые или галечниковые;
- 4) дресвяные или гравийные.

В общей классификации грунтов Е.М. Сергеева, В.П. Приклонского, П.Н. Панюкова и Н.Д. Белого [19] крупнообломочные грунты подразделяются на следующие группы:

- 1) каменные и валунные (преобладают обломки крупнее 200 мм);
- 2) щебнистые и галечниковые (преобладают обломки величиной от 40 до 200 мм);
- 3) дресвяные и гравийные (преобладают обломки размером 20–40 мм).

Важнейшей структурной характеристикой крупнообломочных грунтов, от которой зависят как их физические, так и физико-механические свойства, является

<sup>1</sup> Эти классификации разрабатывались в инженерно-геологических целях, они также составлены на основе подразделения частиц, однако критерии выделения соответствующих фракций здесь по сравнению с первой группой другие (например, классификация В.В. Охотина основана на изменениях свойств грунтов в зависимости от размера частиц) [23].



наличие или отсутствие песчано-глинистого заполнителя. В общей классификации грунтов [19] выделены две подгруппы крупнообломочных грунтов — без заполнителя и с заполнителем. В зависимости от состава и количества заполнителя эти грунты относятся к несвязным или связным.

В соответствии с ГОСТ 25100-95 [6] крупнообломочные грунты относятся к дисперсным осадочным минеральным. Согласно СП 22.13330.2011 [21] при содержании песчаного или глинистого заполнителя в количестве более 40 или 30% соответственно в названии такого грунта необходимо давать наименование вида и характеристику состава заполнителя.

Наиболее подробную классификацию по гранулометрическому составу, первоначально составленную в 1957 г. для щебнисто-глинистых грунтов Южного Крыма и впоследствии дополненную разработал А.И. Шеко [26]. В соответствии с ней крупнообломочные грунты состоят из «мелкозема»<sup>2</sup> и частиц крупнее 2 мм. Построение данной классификации основано на принципе иерархии (группы, подгруппы, классы). По соотношению количеств щебня и дресвы эти грунты подразделяются на две большие группы: (1) с содержанием щебня, превышающим содержание дресвы; (2) с содержанием дресвы, превышающим содержание щебня. Каждая из этих групп состоит из двух подгрупп, которые характеризуются определенным соотношением песчаной и пылеватой фракций: в первой подгруппе песчаные частицы преобладают над пылеватыми, а во второй на-

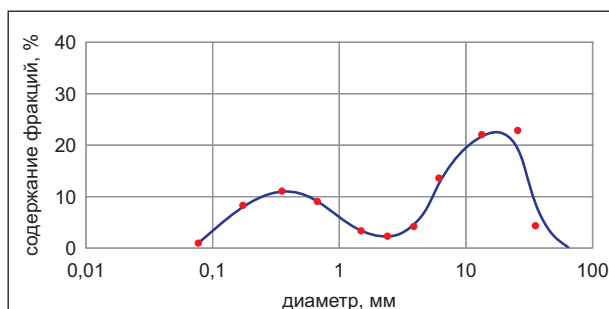


Рис. 2. Кривая распределения крупности (диаметра) частиц гравийно-песчаного грунта с заполнителем [23]

оборот. Далее грунты подразделяются на пять гранулометрических классов по процентному содержанию крупных обломков (размером более 2 мм): I — менее 10%; II — 10÷35%; III — 35÷65%; IV — 65÷90%; V — более 90%. Каждый из этих классов состоит из трех групп — дресвяных (гравийных), щебнистых (галечниковых) и каменных (валунных) грунтов. В зависимости от наличия заполнителя и его качества в этой классификации также выделено несколько подгрупп.

Дальнейшее развитие эта классификация получила в работах Э.М. Доброва и др. [7, 8] для целей дорожного строительства. Эти авторы на основе введенного ими понятия «степень каркасности» (рис. 1) выделили три класса грунтов, различающихся по своей структуре, деформационным и прочностным свойствам.

*I класс* — грунты бескаркасные, содержащие менее 10% крупных обломков. Их свойства определяются свойствами «мелкоземной» части (песка, глины, пыли).

*II класс* — грунты с несовершенным каркасом, содержащие от 10 до 65% крупнообломочных частиц. Их свойства определяются характеристиками как содержащегося в них «мелкозема», так и крупнообломочных частиц. Влияние последних на свойства грунта тем больше, чем выше их содержание. При небольшом количестве крупных обломков они не соприкасаются и разобщены в «мелкоземе», а при увеличении их содержания соприкасаются друг с другом и образуют «структуры зацепления».

*III класс* — каркасные грунты, содержащие более 65% крупнообломочных частиц. Они характеризуются наличием непосредственных контактов между крупными частицами, что предопределяет доминирующее влияние последних на физико-механические свойства этих грунтов. Каркасность структуры грунтов этого класса в значительной степени зависит от состояния глинистой части мелкозема [15].

Крупнообломочные грунты II класса подразделяют на две категории: (1) связные, если заполнитель (с частицами размером менее 2 мм) представляет собой глинистую или суглинистую массу; (2) сыпучие, если заполнитель песчаный [15]. Следует подчеркнуть, что

<sup>2</sup> Данное наименование в качестве термина представляется неудачным, поскольку в инженерно-геологической литературе отсутствуют четкие границы между такими частицами по размеру. Однако оно может использоваться в научных текстах там, где смысл понятен из контекста. Например, в данном случае граница проводится по верхней границе размера песчаной фракции.

<sup>3</sup> Представленный график-треугольник без подписи горизонтальной оси приведен в оригинальной статье автором Э.М. Добровым стр. 108 [7].

Таблица 2

| Нормированные значения плотности крупнообломочных грунтов, г/см <sup>3</sup> [14] |                                                       |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Показатель текучести заполнителя<br>$I_L$ , безразм.                              | Содержание крупных обломков (диаметром более 2 мм), % |      |      |      |      |      |      |
|                                                                                   | 20                                                    | 30   | 40   | 50   | 60   | 73   | 100  |
| $0,00 \leq I_L \leq 0,25$                                                         | 2,03                                                  | 2,08 | 2,13 | 2,17 | 2,21 | 2,27 | 1,70 |
| $0,25 < I_L \leq 0,50$                                                            | 2,02                                                  | 2,07 | 2,11 | 2,15 | 2,19 | 2,26 | 1,70 |
| $0,50 < I_L \leq 0,75$                                                            | 2,00                                                  | 2,05 | 2,09 | 2,13 | 2,17 | 2,25 | 1,70 |

для гравийно-галечных грунтов с песчаным или глинистым заполнителем дифференциальные кривые распределения гранулометрических элементов являются двухмодальными (рис. 2). Максимумы кривой распределения отвечают определенным размерам частиц крупнообломочной фракции и заполнителя [17].

По свойствам скелетных фракций рассматриваемые грунты также подразделяются на группы:

- с водостойкой скелетной частью (коэффициент размягчаемости выше 0,75), которая может быть представлена обломками изверженных и метаморфических пород (гранита, базальта, диорита и др.), почти не изменяющих свои прочностные свойства при увлажнении;
- с неводостойкой скелетной частью (коэффициент размягчаемости ниже 0,75), включающие обломки легко выветривающихся и размягчающихся при увлажнении пород (мела, опоки, мергеля, алевролита, аргиллита и др.) [15].

Согласно ГОСТ 25100-95 [6] по степени неоднородности гранулометрического состава  $C_u$  крупнообломочные грунты подразделяют на однородные ( $C_u \leq 3$ ) и неоднородные ( $C_u > 3$ ).

Обобщая вышесказанное, отметим, что граница 2 мм между мелкоземом (глинисто-пылевато-песчаными частицами) и гравийно-дресвяными частицами имеет хорошее физическое обоснование.

Все эти классификации схожи в главном: к крупнообломочным грунтам относятся породы, содержащие более 50% по массе крупнообломочного материала. Однако при 50%-ном весовом содержании обломков их объемное содержание в грунте составляет порядка 30–45%, т.е. обломки в мелкоземе разобщены и можно предположить, что многие инженерно-геологические особенности такого грунта в большей мере зависят от мелкозема, чем от крупнозернистых включений.

#### Современные представления о влиянии заполнителя на основные физические и физико-механические свойства крупнообломочных грунтов

Наличие или отсутствие песчано-глинистого заполнителя — важнейшая характеристика состава крупнообломочных грунтов. Его присутствие резко сказывается на инженерно-геологических особенностях всех типов таких грунтов. При отсутствии мелкоземного материала они обладают высокой водопроницаемостью, причем движение воды в них носит турбулентный характер. При наличии же заполнителя крупнообломочные грунты могут иметь небольшую водопроницаемость, величина которой определяется его

составом. Присутствие заполнителя, особенно глинистого, также снижает их физико-механические свойства. Поэтому при изучении крупнообломочных грунтов в первую очередь среди них выделяют валунные (каменистые), галечниковые (щебнистые) и гравийные (дресвяные) грунты с заполнителем и без него [22].

*Естественная весовая влажность* крупнообломочных грунтов согласно обобщенным данным изменяется от 1–2 до 20–30% (редко выше) [23]. При этом в подавляющем большинстве случаев влажность их скелетной части практически постоянна и ничтожна по величине. Поэтому валовая влажность крупнообломочных грунтов определяется главным образом степенью заполнения пор водой при отсутствии заполнителя или влажностью песчано-глинистого заполнителя при его наличии.

Для крупнообломочных грунтов выделяют три вида абсолютной влажности: (1) крупных зерен и обломков, (2) песчано-глинистого заполнителя, (3) валовую. Первая практически постоянна, не изменяется с глубиной и в течение года и зависит только от петрографического состава обломков, вторая оказывает существенное влияние на физико-механические свойства крупнообломочных пород, третья характеризует некоторое усредненное количество воды в грунте. При оценке консистенции заполнителя должна использоваться величина влажности мелкозема.

*Плотность твердых частиц* крупнообломочных пород обычно составляет 2,65–2,70 г/см<sup>3</sup> [9]. По данным В.С. Соколова [20], для галечников плотность изменяется в пределах 2,50–2,83 г/см<sup>3</sup>. Для грунтов, содержащих значительное количество обломков основных и ультраосновных пород или целиком состоящих из них, она возрастает до 3,0–3,3 г/см<sup>3</sup> [9].

*Плотность скелета крупнообломочных грунтов* изменяется в широком диапазоне. Для галечниковых и гравийных грунтов, не содержащих большого количества заполнителя, она чаще всего составляет 1,65–1,90 г/см<sup>3</sup>, при наличии песчаного или глинистого заполнителя нередко превышает 2,0 г/см<sup>3</sup> и может достигать 2,15–2,20 г/см<sup>3</sup> [9].

*Плотность* крупнообломочных грунтов повышается при содержании мелкозема в количестве, достаточном для заполнения пространств между более крупными обломками. В качестве материала для земляных сооружений оптимальным является использование грунта с содержанием крупнообломочной фракции 65–70%. Плотность крупнообломочных пород с различным соотношением заполнителя приведена в таблице 2.

Таблица 3

| Прочностные свойства грунта (угол внутреннего трения $\varphi$ , град., и удельное сцепление $C$ , МПа) в зависимости от показателя текучести (консистенции) глинистого заполнителя $I_L$ , безразм. [15] |           |      |           |      |           |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| Состав грунта                                                                                                                                                                                             | $I_L$     |      |           |      |           |      |
|                                                                                                                                                                                                           | 0,0       |      | 0,3       |      | 0,6       |      |
|                                                                                                                                                                                                           | $\varphi$ | $C$  | $\varphi$ | $C$  | $\varphi$ | $C$  |
| 100% глины                                                                                                                                                                                                | 11        | 1,11 | 2         | 0,03 | 0         | 0,02 |
| 75% глины, 25% щебня                                                                                                                                                                                      | 17        | 0,10 | 14        | 0,04 | 14        | 0,00 |
| 50% глины, 50% щебня                                                                                                                                                                                      | 31        | 0,09 | 30        | 0,00 | 28        | 0,00 |
| 25% глины, 75% щебня                                                                                                                                                                                      | 43        | 0,04 | 42        | 0,03 | 41        | 0,03 |
| 50% глины, 25% песка, 25% щебня                                                                                                                                                                           | 28        | 0,08 | 18        | 0,01 | 21        | 0,00 |
| 25% глины, 25% песка, 50% щебня                                                                                                                                                                           | 41        | 0,02 | 37        | 0,03 | 36        | 0,03 |
| 25% глины, 50% песка, 25% щебня                                                                                                                                                                           | 31        | 0,00 | 34        | 0,02 | 38        | 0,02 |
| 33% глины, 33% песка, 33% щебня                                                                                                                                                                           | 34        | 0,05 | 33        | 0,05 | 31        | 0,05 |
| 50% глины, 50% песка                                                                                                                                                                                      | 24        | 0,07 | 18        | 0,06 | 21        | 0,04 |
| 25% глины, 75% песка                                                                                                                                                                                      | 30        | 0,02 | 27        | 0,03 | 25        | 0,01 |
| 75% глины, 25% песка                                                                                                                                                                                      | 16        | 0,13 | 5         | 0,01 | 5         | 0,00 |

Пористость крупнообломочных грунтов чаще всего не превышает 40%, но в ряде регионов она может быть выше. Если присутствует заполнитель, она снижается до 25–30% [23].

Деформационные характеристики крупнообломочных грунтов существенным образом зависят от количества, вида и влажности содержащегося в них мелкозема, степени выветрелости обломков. Модуль упругости грунтов, содержащих более 25% глинистого заполнителя, практически не зависит от прочности обломочной составляющей и определяется гранулометрическим составом и консистенцией мелкозема, находящегося в контакте с крупными частицами [15]. Повышение содержания мелкозема в составе крупнообломочного грунта приводит к снижению его прочностных (табл. 3) и деформационных характеристик, что имеет большое значение, в частности, для оценки давления таких грунтов на подпорные сооружения на склонах.

Сжимаемость крупнообломочных грунтов реализуется в основном за счет песчано-глинистого заполнителя. По величине сжимаемости большая их часть относится к категории слабо- и среднесжимаемых. Наименьшей сжимаемостью характеризуются разности, лишенные заполнителя. Наличие заполнителя, особенно глинистого, увеличивает величину деформации таких грунтов под нагрузкой. Р.Г. Кальберген [10] установил, что в целом для крупнообломочных грунтов модуль деформации имеет следующие значения: 4080 МПа для аллювиальных галечников, 20–50 МПа для делювиально-пролювиальных щебнистых грунтов, 30–60 МПа для элювиальных рыхляков, 7–20 МПа для мерзлых озерно-аллювиальных галечников

при оттаивании. В.С. Соколовым [20] было установлено, что нормативный модуль общей деформации галечников в естественном залегании достигает 229,4 МПа, а расчетный при доверительной вероятности 0,99–183,7 МПа.

Сопротивление сдвигу рассматриваемых грунтов зависит как от крупности и выветрелости обломков, так и от количества, состава и свойств заполнителя [23]. В случае песчаного заполнителя сопротивление сдвигу выше, чем в случае более дисперсного. При наличии последнего его влажность имеет очень большое значение: если она превышает влажность нижнего предела пластичности (хотя бы на несколько процентов), то показатели сопротивления сдвигу снижаются почти на 20% [9]. Повышение степени плотности и неоднородности крупнообломочных грунтов обуславливает повышение угла внутреннего трения.

Крупнообломочные грунты обладают высокой водопоглощающей способностью, которая уменьшается с увеличением начальной влажности глинистого заполнителя. Так, для грунта, содержащего 50% глины и 50% дресвы, с изменением консистенции (показателя текучести) от 0,0 до 0,8 коэффициент водопоглощения при промачивании уменьшается приблизительно в 6 раз. Примерно такая же картина наблюдается и в смеси, состоящей из равного количества (по весу) песка и глины. Наибольшей скоростью водопоглощения обладают крупнообломочные грунты с каркасной структурой и с несовершенным каркасом (рис. 3), содержащие менее 40–50% дисперсного материала [15]. В данном случае под водопоглощением понимается количество поглощенной образцом влаги на данный момент времени.

<sup>4</sup> Коэффициент водопоглощения крупнообломочных грунтов зависит от гранулометрического состава и влажности глинистого мелкозема [8], поэтому его целесообразно упомянуть именно в данном разделе.

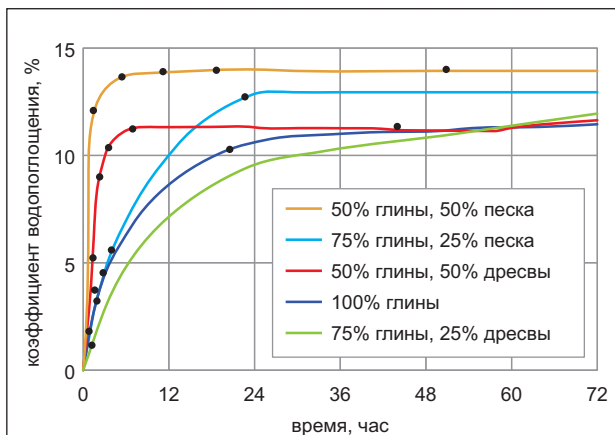


**Рис. 3.** Изменение коэффициента водопоглощения во времени в зависимости от гранулометрического состава крупнообломочного грунта: 1 — 50% глины, 50% песка; 2 — 75% глины, 25% песка; 3 — 50% глины, 50% дресвы; 4 — 100% глины; 5 — 75% глины, 25% дресвы [8]

В качестве показателя степени водопоглощения обычно используется коэффициент  $K^d$ , равный отношению максимального количества (массы) поглощенной воды  $\Delta P$  к первоначальной массе образца  $P$ , выраженный в процентах [8]:

$$K = (\Delta P / P) \cdot 100\%. \quad (1)$$

Как показали исследования Э.М. Доброва и др. [8], значительной водопоглощающей способностью (способны удерживать 23% воды) обладают дресвяно-песчаные и дресвяные грунты. Эти же авторы отмечают, что изменения влажности глинистого заполнителя в составе крупнообломочного грунта могут происходить за весьма короткие промежутки времени, исчисляемые несколькими часами и даже минутами, в особенности если начальная влажность невысока. Это явление об-

ясняется повышенной общей водопроницаемостью крупнообломочных грунтов по сравнению с другими дисперсными грунтами и возможностью увлажнения глинистого заполнителя по более развитой поверхности, образованной его отдельными агрегатами.

Степень снижения прочностных свойств крупнообломочных грунтов с повышением влажности оценивается коэффициентом сдвигоустойчивости, определяемым по соотношению сопротивляемости грунта сдвигу после увлажнения и его начальной (до увлажнения) сдвиговой прочности, которая оценивается величиной предельных напряжений при сдвиге:

$$S_{pw} = ptg\varphi_w + c_w, \quad (2)$$

где  $p$  — нормальное напряжение по площадке сдвига, МПа;  $\varphi_w$ ,  $c_w$  — соответственно угол внутреннего трения, град., и силы общего сцепления, МПа, при текущей влажности глинистого заполнителя [8].

Крупнообломочные грунты, содержащие глинистый мелкозем в твердой или полутвердой консистенции, характеризуются наименьшим коэффициентом сдвигоустойчивости (рис. 4), причем его величина снижается в процессе водонасыщения по мере увеличения содержания в смеси глинистого мелкозема [15].

Рассмотрим основные свойства крупнообломочных пород, скелетная часть которых представлена неводостойкими породами, например алевролитами, аргиллитами<sup>5</sup> и аргиллитоподобными глинами. Аргиллитовые грунты (с обломочной массой из фрагментов аргиллитов, аргиллитоподобных глин и часто алевролитов) являются типичными представителями четвертичных отложений складчатых областей, в частности северо-западной части побережья Черного моря, где с ними связаны широко развитые склоновые процессы. Они подвержены интенсивному разрушению при увлажнении, а также при циклически повторяющихся увлажнении и высыхании, промерзании и оттаивании.

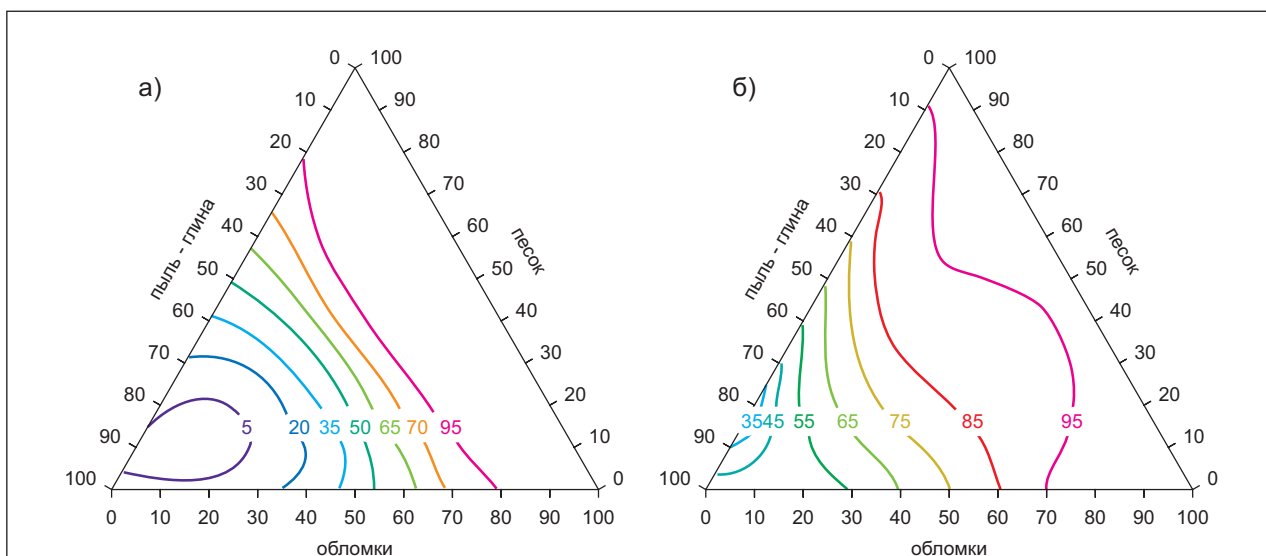


**Рис. 4.** Коэффициенты сдвигоустойчивости  $K_{сдв}$ , %, крупнообломочного грунта при различной консистенции глинистого заполнителя: а — полутвердой ( $I_L = 0$ ); б — тугопластичной ( $I_L = 0,3$ ) [14]

<sup>5</sup> В приложении 1 к методике [14] приведен ход эксперимента, подтверждающий, что аргиллиты являются неводостойкими.



Максимальное снижение сдвигоустойчивости при увлажнении происходит в обломочных аргиллитовых грунтах, не содержащих заполнителя. Сдвигоустойчивость аргиллитовых грунтов повышается при содержании в них 25–30% глинистого мелкозема тугопластичной консистенции [14].

Крупнообломочные грунты, содержащие более 50% обломочных частиц, представленных аргиллитами, при увлажнении обнаруживают под действием нагрузок значительные просадочные деформации. Величина просадочной деформации в аргиллитовых грунтах, не содержащих глинистого или суглинистого материала, достигает максимального значения (220–250 мм/м) [15]. Снижение просадочности крупнообломочных грунтов, содержащих обломки аргиллита, достигается их уплотнением при повышенной влажности. Наиболее оптимальной для этой цели является влажность, при которой мелкозернистая фракция приобретает тугопластичную консистенцию [15]. Так, Э.М. Добровым и др. [8] было установлено, что просадочность грунта повышается с увеличением содержания в нем скелетного крупнообломочного материала. Причем скорость просадки также возрастает с уменьшением содержания в смеси глинистого грунта. Согласно методическим рекомендациям [15] наибольшей просадочностью характеризуются крупнообломочные грунты, содержащие от 15 до 40% глинистого мелкозема в твердой или полутвердой консистенции. Просадочность крупнообломочного грунта выражается через модуль просадки  $I_{np}$  (мм/м), который характеризует просадку (мм) метрового пласта породы под действием на него дополнительной нагрузки.

Для наиболее устойчивых к внешним нагрузкам уплотненных крупнообломочных аргиллитовых грунтов характерно наличие равномерно распределенных мелких пор. Пустоты, образующиеся в грунте вследствие недостаточного количества мелких фракций, неправильных отсыпки и режима уплотнения, при заполнении водой становятся очагами быстрого размокания грунта<sup>6</sup>, что может привести к неравномерным осадкам и потере устойчивости насыпи.

Все вышесказанное подтверждает, что физико-механические свойства крупнообломочных грунтов во многом определяются составом и свойствами заполнителя.

Для экспериментальных исследований состава и свойств песчано-глинистого заполнителя авторами настоящей статьи были выбраны аргиллитово-алевролитовые грунты, представляющие интерес как с точки зрения их недостаточной изученности, так и в практическом отношении. Исследовавшиеся грунты определяют устойчивость склоновых отложений вдоль трассы участка Сочи — Адлер автодороги М-27.

### **Характеристика состава и свойств песчано-глинистого заполнителя щебнистых грунтов Черноморского побережья Краснодарского края**

Экспериментальные исследования были выполнены на щебнистых грунтах с дисперсным заполните-

лем из оползневых и делювиально-оползневых отложений Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа (участка Сочи — Адлер). По гранулометрическому составу рассматриваемые грунты представлены обломками размером от 2 до 63 мм с преобладанием щебня и дресвы различной степени нарушенности и выветрелости — преимущественно аргиллитизированной глиной при незначительном содержании (2–3%) песчаника и алевролита с песчано-пылевато-глинистым заполнителем, составляющим 20–30% грунта по массе (табл. 4). Выбор этих трех предположительно близких по составу грунтов обусловлен стремлением показать сходимость результатов независимых лабораторных опытов по получению природной плотности заполнителя при естественной влажности на приборе стандартного уплотнения в пределах доверительного интервала плотности песчано-глинистого заполнителя, полученной путем расчета согласно приведенной ниже формуле.

Коренные породы на склонах исследуемого участка представлены отложениями сочинской и хостинской свит олигоцена — это аргиллитизированные глины с подчиненными прослоями тонко- и мелкозернистых кварцевых песчаников с глинисто-карбонатным цементом, а также с редкими прослоями алевролитов. Мощность прослоев — не более 0,6 м.

Результаты количественного анализа минерального состава валовых проб (выполненного В.В. Крупской в лаборатории рентгеноструктурного анализа кафедры инженерной и экологической геологии МГУ) показали, что все образцы идентичны, различия составляют первые проценты (табл. 5). Пороодообразующая составляющая мелкозема представлена следующими группами минералов:

- главными: кварцем (до 71,5%), альбитом (8,5–13,6%), кальцитом (10,8–11,9%);
- второстепенными: глинистыми (7–10%) — иллитом, каолинитом; группы смектита; хлоритом;
- аксессуарными: микроклином (1,1%), гипсом (1,1%).

Результаты валового ситового анализа грунтов показали следующее:

- 1) содержание крупнообломочного компонента грунтов не превышает 74–78%, содержание заполнителя варьирует от 22 до 26%;
- 2) размер обломков колеблется в диапазоне от 2 до 70 мм (рис. 5);
- 3) обломки преимущественно угловатые, редко встречаются слабоокатанные (см. табл. 4);
- 4) преобладающей по массе фракцией являются частицы размером 2–10 мм и крупнее, что хорошо прослеживается на гистограмме, представленной на рисунке 6а, на которой четко видны два пика.

Таким образом, среди крупных обломков преобладает щебенисто-дресвяный материал (см. рис. 6а). Результаты гранулометрического анализа заполнителя представлены в таблице 6.

Заполнитель представляет собой, таким образом, полидисперсный грунт, состоящий преимущественно из крупного песка и пылевато-глинистых частиц (рис. 6б).

<sup>6</sup> Речь идет о размокании крупнообломочного грунта в целом, включая заполнитель, а не исключительно о крупнообломочном компоненте. К аргиллитовым грунтам, как пояснено выше, отнесены и широко распространенные образования, формирующиеся по флишевым или молассовым толщам с аргиллитоподобными глинами.

Таблица 4

| Характеристика валовых проб щебнистых грунтов                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фотография и № образца                                                                                | Макроскопическое описание грунта                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>Образец №1</p>    | <p>Грунт коричнево-серый, местами серовато-оливковый. Содержит крупные угловатые обломки размером от 2 до 60 мм с преобладанием дресвы и щебня. Местами встречаются слабоокатанные обломки величиной 50–60 мм. Обломки представлены аргиллитоподобными глинами, редко алевролитами, незначительным количеством песчаника (2–3%). Крупные обломки находятся в песчано-глинистой массе заполнителя, составляющего порядка 20–30% от объема грунта</p> |
| <p>Образец №2</p>   | <p>Грунт коричнево-серый, местами серовато-оливковый. Содержит крупные угловатые обломки размером от 2 до 50 мм с преобладанием дресвы и щебня. Обломки представлены глинами аргиллитоподобными, редко алевролитами, незначительным количеством песчаника (2–3%). Крупные обломки находятся в песчано-глинистой массе заполнителя, составляющего порядка 20–30% от объема грунта</p>                                                                |
| <p>Образец №3</p>  | <p>Грунт коричнево-серый, местами серовато-оливковый. Содержит крупные угловатые обломки размером от 2 до 60 мм с преобладанием дресвы и щебня. Обломки представлены глинами аргиллитоподобными, редко алевролитами, незначительным количеством песчаника (2–3%). Крупные обломки находятся в песчано-глинистой массе заполнителя, составляющего порядка 20–30% от объема грунта</p>                                                                |

Таблица 5

| Содержание минералов в исследованных образцах, %, по результатам рентгеноструктурного анализа |         |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|------|
| Минерал                                                                                       | Образец |      |      |
|                                                                                               | 1       | 2    | 3    |
| Смектит                                                                                       | 1,8     | 2,0  | 1,7  |
| Иллит                                                                                         | 1,3     | 2,2  | 1,6  |
| Каолинит                                                                                      | 1,8     | 2,8  | 2,1  |
| Хлорит                                                                                        | 2,0     | 3,0  | 2,4  |
| Кварц                                                                                         | 71,5    | 68,0 | 67,8 |
| Альбит                                                                                        | 8,5     | 9,6  | 13,6 |
| Кальцит                                                                                       | 11,9    | 11,3 | 10,8 |
| Микроклин                                                                                     | 0,0     | 1,1  | 0,0  |
| Гипс                                                                                          | 1,1     | 0,0  | 0,0  |

На основании расчета квартильного коэффициента  $K_{om}=d_{75}/d_{25}>300$  диаметры частиц, меньше которых в грунте содержится 75 и 25 % указанных фракций, можно сделать вывод, что заполнитель (рис. 7) является неотсортированным.

На рисунке 6в представлена дифференциальная диаграмма численного соотношения фракций в исходном грунте в пересчете на общую массу каждого образца, отобранную для анализа. Таким образом, грунты в целом можно охарактеризовать как полидисперсные неоднородные.

Гигроскопическая влажность заполнителя в целом ниже на 0,4–0,7% таковой для крупных обломков (табл. 7), что, возможно, связано с присутствием в их ультрапорах связанной воды. Этот параметр для кварцевого песчаника составляет менее 1%, что определяется низкой гидрофильностью слагающих его минералов.

На основании данных определения верхнего и нижнего пределов пластичности мелкозема в образцах можно сделать вывод, что исследованный грунт относится к суглинкам (по ГОСТ 25100-95), что не противоречит данным гранулометрического анализа мелкозема.

Величина плотности обломков аргиллитизированной глины (порядка 2,27 г/см<sup>3</sup>) указывает на большую пористость глинистых обломков по сравнению с песчаными (плотность которых составляет порядка 2,38 г/см<sup>3</sup>) и на умеренный катагенез формирования материнских пород (по Л.Б. Рухину [18]). Характеристики физических свойств заполнителя показаны в таблице 8. По своим свойствам заполнители в ис-



Рис. 5. Сравнительные фотографии частиц крупнообломочных компонентов грунтов

следованных образцах практически идентичны, что согласуется с близостью их состава (см. табл. 8).

Так как содержание обломков песчаника и алевролитов в породе незначительно (меньше 2%), т.е. их свойства существенно не влияют на физические характеристики исследованных грунтов в целом, то в последующем при выводе расчетной формулы плотности заполнителя будет принято допущение о том, что плотность грунта в целом определяется исключительно соответствующими показателями обломков аргиллитоподобных глин и самого заполнителя.

### Методика создания образцов заполнителя крупнообломочных грунтов с заданной плотностью для определения его физико-механических свойств

Из приведенного выше обзора опубликованной литературы следует, что во многих случаях поведение крупнообломочных грунтов под внешними нагрузками контролируется физико-механическими свойствами заполнителя и во всех случаях эти свойства влияют на реакцию грунта в целом. Поэтому при из-

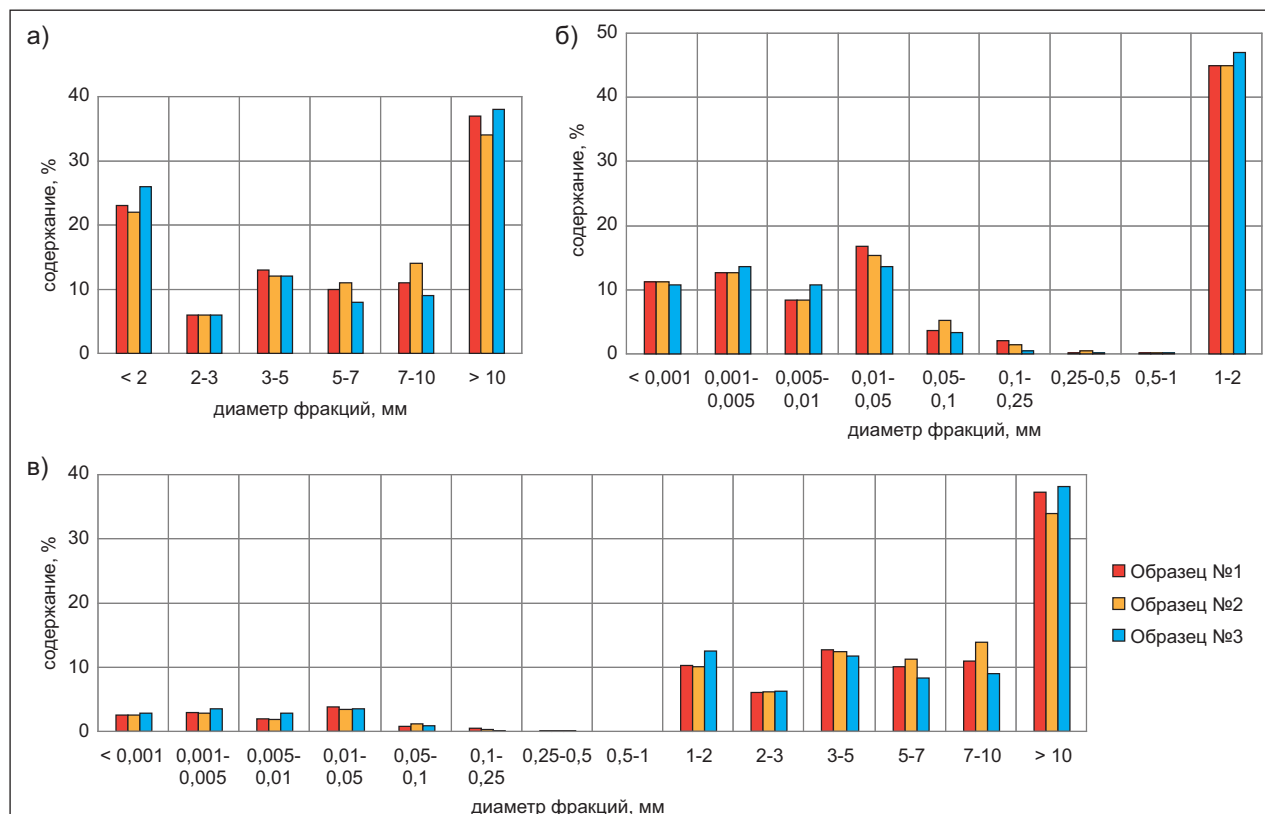


Рис. 6. Дифференциальные диаграммы гранулометрического состава: а — крупнообломочного компонента грунтов с заполнителем; б — дисперсного компонента грунтов; в — исходных образцов (для валовой пробы)

Таблица 6

| Результаты гранулометрического анализа дисперсного заполнителя |                                    |    |    |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|----|----|
| Размер частиц (фракция), мм                                    | Содержание фракции, %, в образце № |    |    |
|                                                                | 1                                  | 2  | 3  |
| 2,0–1,0                                                        | 45                                 | 45 | 47 |
| 1,0–0,5                                                        | 0                                  | 0  | 0  |
| 0,50–0,25                                                      | 0                                  | 1  | 0  |
| 0,25–0,10                                                      | 2                                  | 2  | 1  |
| 0,10–0,05                                                      | 4                                  | 5  | 3  |
| 0,05–0,01                                                      | 17                                 | 15 | 14 |
| 0,010–0,005                                                    | 8                                  | 8  | 11 |
| 0,005–0,001                                                    | 13                                 | 13 | 14 |
| <0,001                                                         | 11                                 | 11 | 11 |

учении крупнообломочных грунтов встает задача экспериментальной оценки физико-механических характеристик отдельно дисперсного заполнителя<sup>7</sup> при его плотности и влажности, соответствующих условиям естественного залегания.

Влажность заполнителя легко определяется в полевой лаборатории стандартным весовым методом, а вот его плотность в естественном сложении обычно недоступна прямому определению, но может быть получена аналитически путем решения обратной задачи по данным лабораторных анализов.

Решение для расчета плотности заполнителя ( $\rho_z$ ) может быть получено на основании следующих показателей грунта и его компонентов:

- средней плотности грунта в массиве ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>), которая определяется в массиве одним из возможных прямых методов, например мерного куба;
- влажности заполнителя в массиве ( $W_z$ , %), определяемой в лаборатории весовым способом;

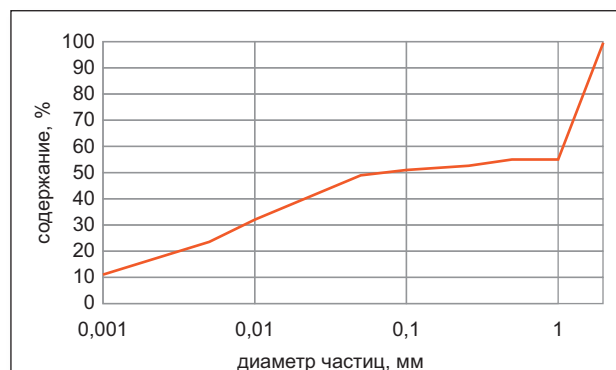


Рис. 7. Интегральный график гранулометрического состава дисперсного компонента грунтов

- влажности крупнообломочного компонента в массиве ( $W_o$ , %), устанавливаемой в лаборатории весовым способом;
- плотности обломков ( $\rho_o$ , г/см<sup>3</sup>), которая определяется в лаборатории методом гидростатического взвешивания;
- массовой доли заполнителя в сухом состоянии, определяемой из массы заполнителя ( $m_z$ , г) и массы обломков ( $m_o$ , г) в представительной навеске грунта;
- гигроскопической влажности заполнителя ( $W_g^z$ , %) и крупнообломочного компонента ( $W_g^k$ , %), определенных в лаборатории методом высушивания до постоянной массы.

Средняя плотность в массиве имеет следующее соотношение с плотностями его компонентов:

$$\rho = \frac{m_z}{V_z} = \frac{m_z + m_o}{V_z + V_o} = \frac{m_z + m_o}{\frac{m_z}{\rho_z} + \frac{m_o}{\rho_o}} \quad (3)$$

где  $m_z$  — общая масса грунта;  $V_z$  — суммарный объем грунта;  $V_z$  — объем заполнителя;  $V_o$  — объем обломков.

Тогда:

$$\rho_z = \frac{\rho \cdot m_z}{m_z + m_o - m_o \cdot \frac{\rho}{\rho_o}} \quad (4)$$

Таблица 7

| Гигроскопическая влажность образцов грунта и их компонентов |         |     |     |       |
|-------------------------------------------------------------|---------|-----|-----|-------|
| Гигроскопическая влажность, %                               | Образец |     |     | Сред. |
|                                                             | 1       | 2   | 3   |       |
| Грунта $W_g$                                                | 2,4     | 2,6 | 2,5 | 2,5   |
| Заполнителя $W_g^z$                                         | 2,2     | 2,0 | 2,2 | 2,1   |
| Крупных обломков (аргиллита) $W_g^{k-a}$                    | 2,7     | 2,8 | 2,6 | 2,7   |
| Крупных обломков (песчаника) $W_g^{k-n}$                    | 0,8     | 0,8 | 1,0 | 0,9   |

<sup>7</sup> Это необходимо для выяснения влияния свойств заполнителя на свойства грунта в целом, что не только представляет собой интересную грунтоведческую задачу, но и позволяет, в частности, прогнозировать свойства насыпного грунта.

Таблица 8

| Показатели физических и физико-химических свойств компонентов грунта                   |         |      |      |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|------|-------|
| Показатель                                                                             | Образец |      |      | Сред. |
|                                                                                        | 1       | 2    | 3    |       |
| Нижний предел пластичности заполнителя $W_p$ , %                                       | 22      | 21   | 21   | 21    |
| Верхний предел пластичности заполнителя $W_L$ , %                                      | 35      | 34   | 35   | 35    |
| Число пластичности заполнителя $I_p$ , %                                               | 13      | 13   | 14   | 13    |
| Плотность крупных обломков (аргиллита) $\rho_g^{к-а}$ , г/см <sup>3</sup>              | 2,27    | 2,27 | 2,28 | 2,27  |
| Плотность крупных обломков (песчаника) $\rho_g^{к-п}$ , г/см <sup>3</sup>              | 2,39    | 2,38 | 2,36 | 2,38  |
| Плотность твердой фазы заполнителя $\rho_s^3$ , г/см <sup>3</sup>                      | 2,65    | 2,66 | 2,66 | 2,66  |
| Плотность твердой фазы крупных обломков (аргиллита) $\rho_s^{к-а}$ , г/см <sup>3</sup> | 2,68    | 2,68 | 2,69 | 2,67  |
| Плотность твердой фазы крупных обломков (песчаника) $\rho_s^{к-п}$ , г/см <sup>3</sup> | 2,62    | 2,62 | 2,61 | 2,62  |

Разделим числитель и знаменатель на  $m_o$ :

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot \frac{m_s}{m_o}}{\frac{m_s}{m_o} + 1 - \frac{\rho}{\rho_o}} \quad (5)$$

Соотношение  $m_s / m_o$  при естественной влажности находим по формуле:

$$\frac{m_s}{m_o} = \frac{m_c^3 \cdot (1 + 0,01 \cdot W_s)}{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_o)},$$

но  $\frac{m_s^3}{m_g^o} = \mu = \frac{m_c^3 \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g^3)}{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g^o)}$  (6)

где  $m^g$  и  $m^c$  — массы компонентов при гигроскопической влажности и в абсолютно сухом состоянии соответственно.

Следовательно:

$$\frac{m_s}{m_o} = \mu \cdot \frac{(1 + 0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1 + 0,01 \cdot W_s)}{(1 + 0,01 \cdot W_g^3) \cdot (1 + 0,01 \cdot W_o)} \quad (7)$$

Выразим  $\rho_o$  через плотность обломков, полученную в лабораторных исследованиях при гигроскопической влажности:

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o} = \frac{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_o)}{V_o} \quad (8)$$

$$\rho_g^o = \frac{m_g^o}{V_o'} = \frac{m_c^o \cdot (1 + 0,01 \cdot W_g^k)}{V_o'} \quad (9)$$

Изменение объема крупнообломочного компонента при изменении его влажности пренебрежимо мало. Отсюда следует, что  $V_o(W) = \text{const}$ ,  $V_o = V_o'$ . Тогда:

$$\rho_o = \rho_g^o \cdot \frac{(1 + 0,01 \cdot W_o)}{(1 + 0,01 \cdot W_g^k)} \quad (10)$$

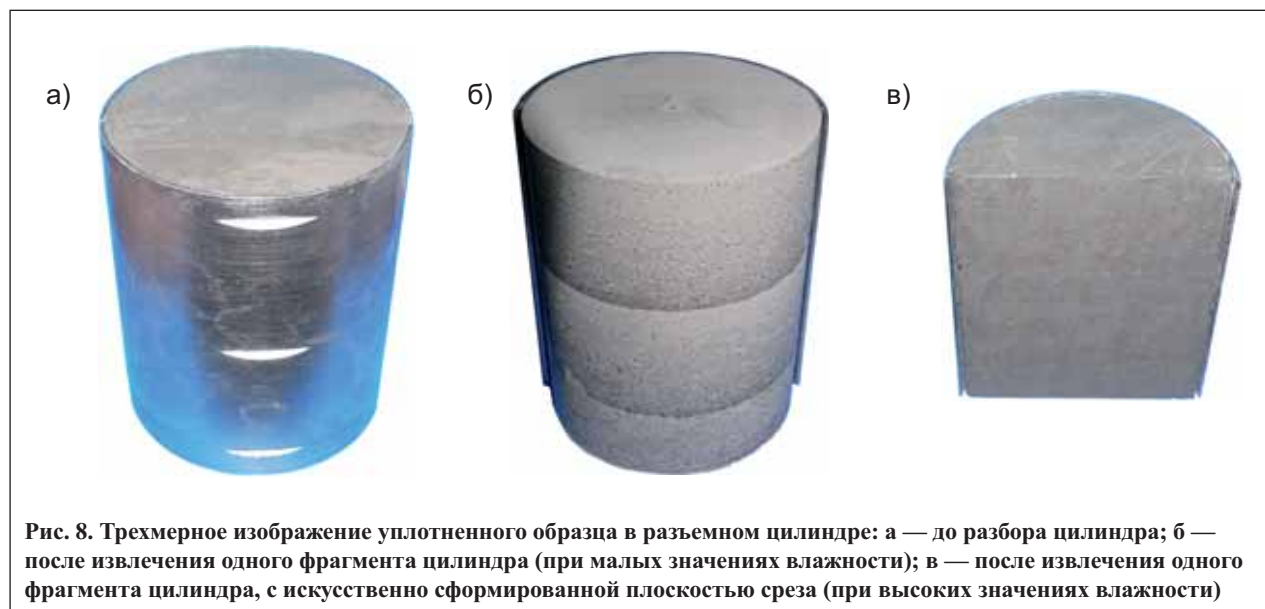


Рис. 8. Трехмерное изображение уплотненного образца в разъемном цилиндре: а — до разбора цилиндра; б — после извлечения одного фрагмента цилиндра (при малых значениях влажности); в — после извлечения одного фрагмента цилиндра, с искусственно сформированной плоскостью среза (при высоких значениях влажности)

Подставим уравнения (7) и (10) в уравнение (5), получим:

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot \mu \cdot \frac{(1+0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1+0,01 \cdot W_s)}{(1+0,01 \cdot W_g^s) \cdot (1+0,01 \cdot W_o)}}{\mu \cdot \frac{(1+0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1+0,01 \cdot W_s)}{(1+0,01 \cdot W_g^s) \cdot (1+0,01 \cdot W_o)} + 1 - \frac{\rho \cdot (1+0,01 \cdot W_g^k)}{\rho_g^k \cdot (1+0,01 \cdot W_g^s)}} \quad (11)$$

Упрощая выражение (11), получаем конечную формулу для расчета плотности заполнителя в массиве:

$$\rho_s = \frac{\rho \cdot \mu}{\mu \cdot \frac{(1+0,01 \cdot W_g^s) \cdot (1+0,01 \cdot W_o)}{(1+0,01 \cdot W_g^k) \cdot (1+0,01 \cdot W_s)} - \frac{\rho \cdot (1+0,01 \cdot W_g^k)}{\rho_g^k \cdot (1+0,01 \cdot W_g^s)}} \quad (12)$$

Далее встает задача получения образцов заполнителя при влажности и плотности, соответствующих расчетным. Оптимальным вариантом авторам представляется способ ударного уплотнения, позволяющий варьировать энергию воздействия и получать объемы грунта, пригодные для последующей подготовки стандартных цилиндрических образцов для физико-механических испытаний (на компрессию, сдвиг, трехосное сжатие).

При прочих равных условиях, плотность грунта при ударном уплотнении зависит прежде всего от работы этого уплотнения. При этом плотность заполнителя в массиве, разумеется, не соответствует максимальной плотности при той же влажности, которую можно получить в соответствии с ГОСТ 22733-77. В связи с этим авторами предлагается методика получения образца заполнителя крупнообломочного грунта с заданными плотностью и влажностью путем определения оптимальной работы ударного уплотнения.

Для демонстрации возможности реализации такой схемы были проведены испытания с образцами заполнителя при влажности, соответствующей природной, на установке ударного уплотнения ГТ 1.4.1 конструкции НПП «Геотек».

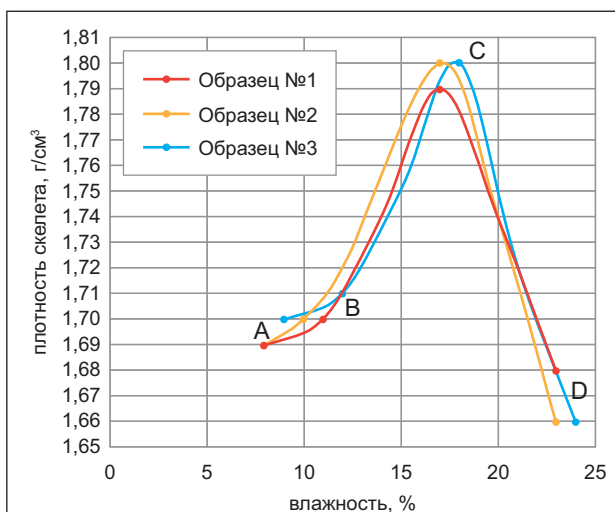


Рис. 9. Кривые стандартного<sup>8</sup> уплотнения заполнителя

Навеска воздушно-сухого образца массой 0,6 кг доводилась до нужной влажности и помещалась в разъемный цилиндр (рис. 8). Начальная влажность в опытах составляла 8–9% и при каждом последующем испытании увеличивалась с шагом 2–3%. Испытания заключались в динамическом уплотнении грунта с разным количеством ударов. Величина затрачиваемой энергии при этом менялась от 7,5 до 300 Дж, что соответствует диапазону ударов от 1 до 40. Динамическая энергия уплотнения определяется совершаемой работой по перемещению снаряда от верхней точки к наковальне в поле силы тяжести. Потенциальная энергия снаряда в верхней точке определяется как  $E_n = mgh$  (где  $h$  — высота падения груза, равная 0,3 м;  $m = 2,5$  кг — масса груза;  $g$  — ускорение свободного падения, равное

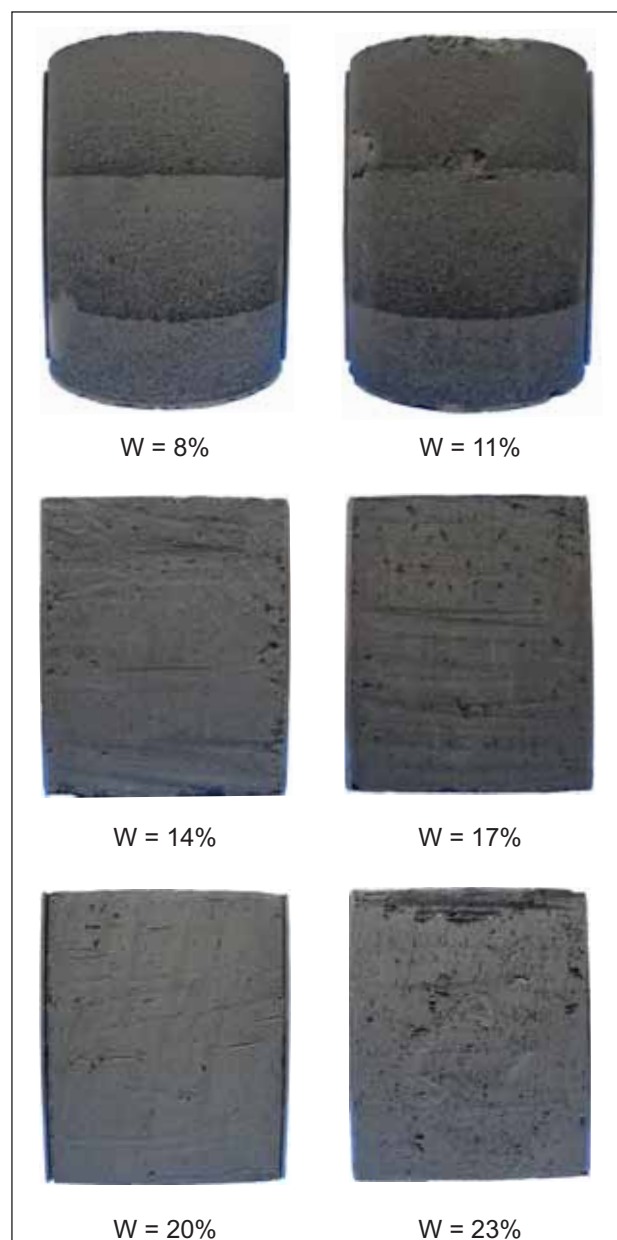


Рис. 10. Срезы полученных ударным уплотнением образцов заполнителя при разной влажности

<sup>8</sup> Испытания, представленные в виде графической зависимости, выполнены в соответствии со стандартами (по ГОСТ 22733-20020) определения оптимальной влажности и максимальной плотности при числе ударов  $N = 40$ .

Таблица 9

| Осредненные расчетные показатели* для глинистых пород (по Н.Н. Маслову [12]) |            |        |       |            |        |       |            |        |       |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|--------|-------|------------|--------|-------|------------|--------|-------|
| Консистенция образца грунта                                                  | Глины      |        |       | Суглинки   |        |       | Супеси     |        |       |
|                                                                              | $\gamma_w$ | $\phi$ | $c$   | $\gamma_w$ | $\phi$ | $c$   | $\gamma_w$ | $\phi$ | $c$   |
| Твердая                                                                      | 2,15       | 22     | 0,100 | 2,15       | 25     | 0,060 | 2,05       | 28     | 0,020 |
| Полутвердая                                                                  | 2,10       | 20     | 0,060 | 2,10       | 23     | 0,040 | 2,00       | 26     | 0,015 |
| Тугопластичная                                                               | 2,05       | 18     | 0,040 | 2,00       | 21     | 0,025 | 1,95       | 24     | 0,010 |
| Мягкопластичная                                                              | 1,95       | 14     | 0,020 | 1,90       | 17     | 0,015 | 1,90       | 20     | 0,005 |
| Текучепластичная                                                             | 1,90       | 8      | 0,010 | 1,85       | 13     | 0,010 | 1,85       | 18     | 0,002 |
| Текучая                                                                      | 1,80       | 6      | 0,005 | 1,80       | 10     | 0,005 | 1,80       | 14     | 0,000 |

\*  $\gamma_w$  — плотность грунта при влажности  $W$ , г/см<sup>3</sup>;  $\phi$  — угол внутреннего трения, град.;  $c$  — удельное сцепление, МПа.

9,8 м/с<sup>2</sup>), причем общая работа  $E_o$  кратна результирующему количеству ударов:  $E_o = E_n \cdot n$  (где  $n$  — количество ударов). Пренебрегая потерями энергии на трение боковой поверхности снаряда о штангу и нагреванием грунта и рабочей части прибора при ударе, из закона сохранения энергии получаем, что динамическая работа уплотнения равна  $E_o = mghn$ .

После завершения трамбования определялась плотность грунта, а по полученным данным строились и анализировались ее зависимости от количества ударов при разной влажности.

Полученные данные показали (рис. 9), что максимальная плотность скелета исследованного заполнителя составляет 1,79–1,80 г/см<sup>3</sup> при оптимальной влажности уплотнения 17–18%. При уплотнении образцов в диапазоне влажности 8–12% изменение плотности скелета грунта незначительно (участок АВ), т.к. после превышения максимальной гигроскопической влажности, которая для исследованных образцов близка к 8%, на влагу переходного типа приходится не более 3–4%, что затрудняет перераспределение частиц под действием ударной нагрузки. При дальнейшем увеличении влажности вплоть до оптимальной происходит быстрое увеличение плотности скелета по следующим причинам (участок ВС).

- Формируются все новые порции осмотической<sup>9</sup> влаги, которые снижают трение в системе, вследствие чего перераспределение частиц под действием ударной нагрузки происходит более эффективно. При переходе к более плотной упаковке структурных элементов отжимается воздух из порового пространства и система стремится перейти из трехфазной в двухфазную. В результате формирующийся грунт становится более однородным и содержит все меньше крупных пустот, что видно по изменению текстурных особенностей уплотненных образцов при различных значениях влажности (рис. 10).
- Максимальная плотность будет соответствовать состоянию, при котором объем порового пространства, занятый воздухом, будет минимален при минимально возможной влажности. Согласно выводам В.А. Приклонского, оптимальная влажность уплотнения очень близка к нижнему пределу пластичности и ниже последнего на 2–3% [11].

Дальнейшее увеличение влажности приводит к уменьшению плотности скелета грунта, т.к. в условиях опыта на уплотнение с применением динамической нагрузки отжатие влаги из глинистого грунта затрудняется его низкой водопроницаемостью (участок CD).

Для достижения рассчитанной плотности скелета заполнителя при его природной влажности 19% была проанализирована зависимость первой от числа ударов в условиях стандартного уплотнения (рис. 10). Оптимальное количество ударов для получения искомой плотности скелета грунта при заданной влажности  $W = 19\%$  составило 7.

Определение прочностных характеристик заполнителя на полученных по описанной методике образцах проводились затем методом одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248-96 по консолидировано-дренированной схеме из расчета 100 мин. на одно испытание (получение одной точки), с постоянной скоростью среза (0,05 мм/мин.). Для каждого образца проводилось 4 испытания по схеме приложения нормальной нагрузки 0,1–0,3 МПа и 0,2–0,4 МПа. В результате при влажности заполнителя 19% его прочностные характеристики в среднем составили: угол внутреннего трения  $\phi = 21^\circ$ ; удельное сцепление  $c = 0,050$  МПа, что согласуется с расчетными данными для рассматриваемого вида грунта по Н.Н. Маслову [12] (табл. 9).

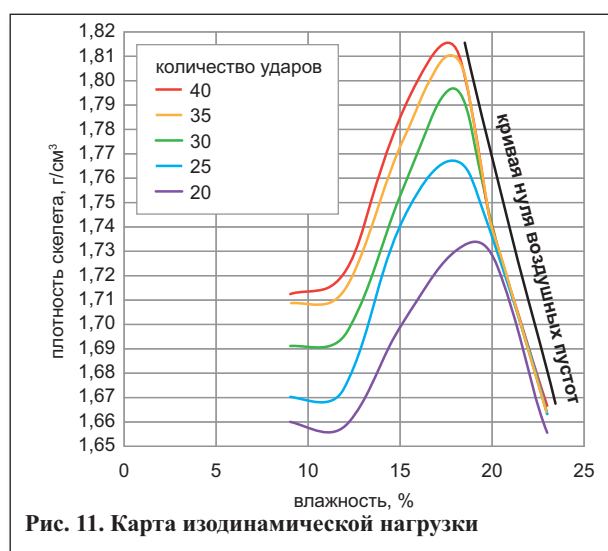


Рис. 11. Карта изодинамической нагрузки

<sup>9</sup> Известно, что при влажности глинистых грунтов меньше нижнего предела пластичности и, следовательно, ниже влажности оптимального уплотнения преобладающим типом влаги в грунте является осмотическая вода (стр. 152 [23]).

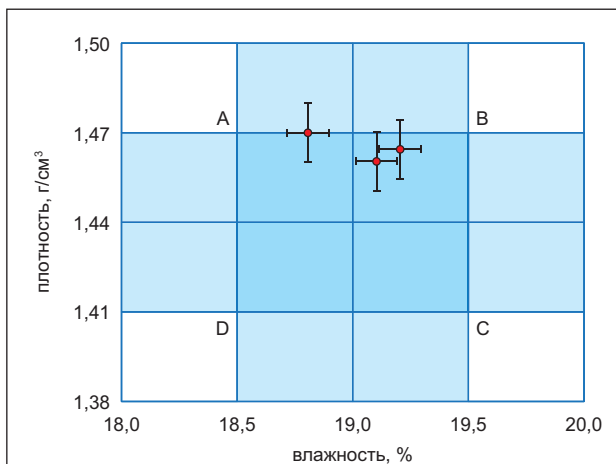


**Рис. 12. Сопоставление экспериментальных значений плотности заполнителя при естественной влажности с доверительными интервалами рассчитанной плотности заполнителя при естественной влажности**

Сопоставляя результаты уплотнения для одинакового количества ударов, можно получить графическое представление численных соотношений в виде карты<sup>10</sup> изодинамического нагружения (рис. 11). Общий вид кривых соответствует графикам, полученным в результате стандартного уплотнения трех образцов. По диаграммам видно, что при увеличении нагрузки кривые сгущаются, т.е. плотность скелета грунта подчиняется критерию сходимости (при нагрузке выше критической изменение плотности грунта не будет иметь места). Применение более интенсивного уплотнения уменьшает оптимальную влажность с одновременным увеличением соответствующей ей максимальной плотности скелета уплотненного грунта.

Кроме экспериментальных кривых на рисунке 11 представлена теоретическая «кривая нуля» воздушных пустот, которая показывает, какую максимальную плотность скелета при данной влажности может приобрести грунт, если его поры будут полностью заполнены водой. Однако при любом уплотнении образцов в них остается некоторый объем заземленного воздуха. Графически это количество отображено отрезком, параллельным оси абсцисс, заключенным между экспериментальной и теоретической кривыми.

Указанная теоретическая кривая была получена с использованием следующей формулы<sup>11</sup> [11]:

$$W = (\rho_s - \rho_d) / \rho_s \rho_d, \quad (13)$$

где  $W$  — влажность грунта, %;  $\rho_s$  — плотность твердых частиц грунта;  $\rho_d$  — плотность скелета грунта.

Описанная методика получения требуемой плотности скелета заполнителя крупнообломочных грунтов при данной влажности позволила определить оптимальную работу ударного уплотнения заполнителя для приготовления его образцов с заданными значениями плотности и влажности. Для плотностных и влажностных показателей свойств заполнителя, полученных по этой методике, были рассчитаны ошибки косвенных измерений в соответствии с классической теорией ошибок [27]. По полученным ошибкам были построены доверительные интервалы данных показателей (рис. 12). Полученные значения плотности и влажности лежат в пределах пересечения доверительных интервалов. Таким образом, данные лабораторных исследований не выходят за рамки пределов погрешности экспериментальных определений и могут рассматриваться как истинные значения.

## Выводы

1. Исследованные склоновые отложения Черноморского побережья Краснодарского края представлены крупнообломочными щебнисто-дресвяными грунтами с неоднородным песчано-глинистым заполнителем. Содержание в них крупнообломочного компонента не превышает 74–78%, содержание заполнителя колеблется от 22 до 26%.

2. Физические, физико-химические и физико-механические свойства заполнителя характеризуются следующими показателями: плотность твердых частиц — 2,65–2,66 г/см<sup>3</sup>; нижний предел пластичности — 21–22%; верхний предел пластичности — 34–35%; максимальная плотность скелета в результате стандартного уплотнения — 1,79–1,80 г/см<sup>3</sup>; оптимальная влажность уплотнения — 17–18%; угол внутреннего трения — 21°, сцепление — 0,048–0,053 МПа при естественной плотности и влажности. Расчетная плотность скелета заполнителя в естественных условиях составила (с учетом ошибки для косвенных измерений)  $1,44 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup>.

3. Разработанная методика<sup>12</sup> получения требуемой плотности скелета заполнителя крупнообломочных грунтов при данной влажности позволила определить работу ударного уплотнения заполнителя для приготовления его образцов с заданными значениями плотности и влажности, а его характеристики, установленные таким образом, не выходят за рамки пределов погрешности экспериментальных лабораторных определений. Следовательно, предложенная методика может использоваться для оценки физико-механических свойств дисперсного заполнителя крупнообломочных грунтов при решении научных и практических инженерных задач.

<sup>10</sup> Использование термина «карта» обусловлено изображением трехмерной зависимости на плоскости по аналогии с представлением информации в картографии.

<sup>11</sup> Эта методика описана Н.В. Коломенским и взята из его работы [11], кривая получена согласно формуле (12) путем подставления в нее значений плотности скелета и плотности твердых частиц — в итоге получается серия точек, по которым строится кривая «влажность — плотность».

<sup>12</sup> В отношении ее отличий от уже имеющейся методики ударного уплотнения можно сказать следующее. Ближайшим аналогом стандартного уплотнения является модернизированный метод Проктора, который широко применяют во многих странах для определения максимальной плотности грунта. Однако авторами она была принята в другом ключе, а именно использовалась в целях получения природной плотности заполнителя при естественной влажности на приборе стандартного уплотнения в пределах доверительного интервала плотности песчано-глинистого заполнителя, полученной расчетом согласно выведенной формуле (11).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балыков Б.И., Ефремов А.В., Никитин Н.И., Сазонов А.В.* Исследования крупнообломочных грунтов и грунтовых материалов, используемых при строительстве плотины Сангтудинской ГЭС-1 // Гидротехническое строительство. 2008. № 5. С. 75–80.
2. *Балыков Б.И.* Способ оценки представительности проб крупнообломочного грунта при инженерно-геологических изысканиях и геотехконтроле качества уплотнения // Инженерная геология. 2007. № 2. С. 21–25.
3. *Борткевич С.В.* Роль технологических исследований в научном обосновании плотин из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. 2009. № 8. С. 31–35.
4. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 1997.
5. ГОСТ 22733-77. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Госстрой СССР, 1977.
6. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 1995.
7. *Добров Э.М. и др.* Крупнообломочные грунты в дорожном строительстве. М.: Транспорт. 1981. 180 с.
8. *Добров Э.М.* Влияние состава крупнообломочных грунтов на их физико-механические свойства // Труды СОЮЗДОРНИИ. 1972. Вып. 80. С. 107–128.
9. Инженерная геология России. Том 1. Грунты России: монография / под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. М.: КДУ, 2011. 672 с.
10. *Кальбергенов Р.Г.* Методика определения физико-механических свойств крупнообломочных грунтов: автореф. дис... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во ПНИИС, 1987. 25 с.
11. *Коломенский Н.В.* Инженерная геология Ч. I. М.: Гос. изд-во геологической литературы, 1951. 283 с.
12. *Маслов Н.Н.* Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М.: Госэнергоиздат. 1956. С. 99.
13. *Массух М.* Исследования закономерностей деформирования крупнообломочных грунтов при циклических нагрузках для целей автодорожного строительства: автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. М.: МГУ им. Ломоносова. 1986. 198 с.
14. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. М.: Стройиздат, ДальНИИС Госстроя СССР. 1989. 24 с.
15. Методические рекомендации по сооружению насыпей земляного полотна автомобильных дорог из крупнообломочных грунтов. М.: Изд-во СОЮЗДОРНИИ, 1977. 33 с.
16. *Петров Г.Н., Радченко В.Г.* О стандартизации крупнообломочных грунтов // Гидротехническое строительство. 2009. № 2. С. 4–12.
17. *Петров Г.Н., Радченко В.Г., Дубняк В.А.* Крупнообломочные грунты в гидротехническом строительстве. СПб.: АО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1994. 236 с.
18. *Рухин Л.Б.* Основы литологии. Л.: Гостоптехиздат, 1969. 780 с.
19. *Сергеев Е.М., Приклонский В.А., Панюков П.Н., Белый Л.Д.* Общая инженерно-геологическая классификация горных пород и почв // Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 18–44.
20. *Соколов В.С.* Методика и результаты исследований инженерно-геологических свойств галечниковых пород при повышенных требованиях к основанию: автореф. дисс... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГРИ им. С. Орджоникидзе, 1975. 19 с.
21. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2011. 161 с.
22. СП 35.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\*). Мосты и трубы. М.: Минрегион России, 2010. 346 с.
23. *Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С.* Грунтоведение // под ред. В.Т. Трофимова. М.: МГУ, Наука, 2005. 1024 с.
24. *Ухов С.Б., Конвиз А.В., Семенов В.В.* Механические свойства крупнообломочных грунтов с заполнителем // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. № 1. С. 2–7.
25. *Федоров В.И.* Прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочно-глинистых грунтов. М.: Стройиздат, 1988. 136 с.
26. *Шеко А.И.* Методика изучения и прогноза экзогенных геологических процессов. М.: Недра, 1988. 215 с.
27. *Taylor J.R.* Introduction to error analysis. Herndon, VA, USA: University Science Books, 1997. 327 с.

# УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ В ОТЛОЖЕНИЯХ БРОВКИ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ ПОСЕЛКА АРХИПО-ОСИПОВКА

## SUBMARINE LANDSLIDES FORMATION IN THE SHELFBREAK SEDIMENTS OF THE BLACK SEA NEAR ARCHIPO-OSIPOVKA

**ИОНОВ В.Ю.**

Кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, sevaionov@gmail.com

**КАЛИНИН Э.В.**

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., engeol@geol.msu.ru

**ФОМЕНКО И.К.**

Главный специалист по изысканиям московского филиала компании «Галф Интерстейт Инжиниринг», к.г.-м.н., г. Москва, ifolga@gmail.com

**МИРОНЮК С.Г.**

Начальник сектора опасных геологических процессов ООО «Питер Газ», г. Москва, mironyuk.Sergey@petergaz.com

**IONOV V.J.**

Lomonosov Moscow State University, faculty of geology, chair of engineering and ecological geology, sevaionov@gmail.com

**KALININ E.V.**

Professor of Lomonosov Moscow State University, faculty of geology, chair of engineering and ecological geology, engeol@geol.msu.ru

**FOMENKO I.K.**

Chief specialist for engineering survey of the moscow branch of the «Gulf Interstate Engineering» company, Moscow, ifolga@gmail.com

**MIRONYUK S.G.**

Chief of Geohazard Sector of «Peter Gaz» LLC, Moscow, Mironyuk.Sergey@petergaz.com

### Ключевые слова:

подводные оползни; условия формирования; Черное море; шельф; бровка континентального склона; гравитационные процессы; оценка устойчивости склона; морские грунты; физико-механические свойства; коэффициенты сейсмичности.

### Key words:

submarine landslides; triggering mechanisms; the Black Sea; shelf; shelfbreak; mass movement processes; slope stability analysis; marine sediments; physical-mechanical properties; seismic coefficients.

### Аннотация

В статье на примере участка, расположенного в области бровки континентального склона в северо-восточной части Черного моря, рассмотрены условия формирования подводных оползней. Выполнены расчеты устойчивости склонов с помощью одномерного и двухмерного моделирования с учетом возможных сейсмических воздействий (коэффициентов сейсмичности). Расчеты по одномерным моделям позволили выявить разновидности грунтов, которые могут выступать в роли основных деформируемых горизонтов. Такими грунтами являются илы. Результаты двухмерных расчетов показали, что в статических условиях область шельфа находится в устойчивом состоянии, а в области континентального склона возможно формирование оползней в отложениях, представленных илами и супесями. Из анализа с учетом сейсмических воздействий следует, что глинистые разновидности грунтов теряют устойчивость при сейсмических нагрузках интенсивностью 7 баллов, а песчаные — при 8 баллах и более.

### Введение

В последние 20 лет происходит активное освоение месторождений нефти и газа на шельфах Российской Федерации: строятся протяженные морские трубопроводы, такие как «Голубой поток», «Джубга — Лазаревское — Сочи» и «Южный поток».

При освоении месторождений сооружения добычного комплекса обычно располагают на участках с относительно простыми инженерно-геологическими условиями, в то время как подводные трубопроводы зачастую пересекают участки возможного развития подводных гравитационных процессов. Все перечисленные выше трубопроводы проходят по дну Черного моря, а два из них («Голубой поток» и «Южный поток») пересекают область континентального склона — участок, наиболее опасный с точки зрения развития подводных оползней.

Необходимо отметить, что в пределах российского сектора Черного моря обнаружен ряд структур, перспективных для добычи углеводородов [2]. При этом некоторые из месторождений расположены у подножия континентального склона и могут находиться под воздействием подводных гравитационных процессов, что, несомненно, затруднит их освоение.

Целью настоящей статьи является выявление условий формирования подводных оползней в области Кавказского шельфа и бровки континентального склона Черного моря. В соответствии с поставленной целью должны быть решены следующие задачи: (1) изучение инженерно-геологических условий указанного участка; (2) составление расчетной схемы для оценки устойчивости

### Abstract

Herein on an example area which is situated at the shelfbreak in the north-eastern part of the Black Sea the formation of submarine landslides is discussed. 1D and 2D slope stability analyses were carried out taking into account possible seismic loads. The 1D analysis revealed soil types within a slip surface could be enclosed. Such soils are organic clays. The 2D analysis shows that in static conditions the shelf area is stable but in organic clays and silts on the continental slope landslides may develop. The slope stability analysis with seismic force shows that clayey soils become unstable under seismic loads of intensity VII and sandy soils do under impacts of intensity VIII and higher.

склонов в соответствии с особенностями подводных инженерно-геологических условий; (3) оценка устойчивости подводных склонов на исследуемом участке.

Одной из первых публикаций, посвященных подводным оползневым процессам в пределах Черного моря, является работа А.Д. Архангельского 1930 года [1], в которой показано, что они повсеместно развиты на континентальном склоне, о чем свидетельствует перемятый вид осадков в кернах станций прободобора. В дальнейшем подводные гравитационные процессы Кавказского шельфа рассматривались в 1980-е годы во время исследований подводных каньонов [11, 12, 13]. В конце XX века сотрудниками научного центра «Южморгеология» при проведении геофизических работ был обнаружен гигантский оползень площадью 200 км<sup>2</sup> в области конуса выноса реки палео-Кубань [6]. В начале XXI века проблемами подводных оползней на Кавказском шельфе активно занимается круг авторов из Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН [10, 8].

Выводы всех исследователей показывают, что подводные оползни широко развиты на дне Черного моря и могут обладать колоссальными размерами.

При ознакомлении с публикациями, связанными с данной темой, было обнаружено, что, несмотря на широкое распространение на подводных склонах Черного моря гравитационных процессов, они являются слабо изученными. На это указывает и практически полное отсутствие работ по этим проблемам за последние 5 лет.

В публикациях встречаются в основном результаты геофизических и гидрографических исследований, в единичных работах можно найти данные опробования. Ни один из исследователей в явном виде не приводит информации о факторах формирования подводных оползней в Черном море. Практически полностью отсутствуют результаты бурения, а также моделирования подводных гравитационных процессов. Редко можно обнаружить данные о физических свойствах донных осадков и практически полностью отсутствует информация о физико-механических характеристиках грунтов.

Активное освоение акватории Черного моря и слабая изученность подводных оползневых процессов говорят о необходимости детального изучения и прогноза развития последних в данном регионе. Для их исследования был выбран участок, прилегающий к бровке континентального склона в 9 км к югу от поселка Архипо-Осиповка в северо-восточной части Черного моря (рис. 1).

### Инженерно-геологические условия рассматриваемого участка

Рассматриваемый участок ограничен с северо-востока изобатой 40 м, а с юго-запада — изобатой 1400 м. Ширина шельфа здесь составляет от 4,0 до 9,5 км. Бровка континентального склона, после которой начинается резкий свал глубин в северо-западной части участка, начинается с изобаты 70 м, постепенно снижаясь в юго-восточном углу до изобаты 100 м.

Внешний шельф представляет собой пологую аккумулятивную равнину с уклоном менее 1°. При приближении к бровке континентального склона поверхность рельефа становится неровной, уклон возрастает и в месте свала глубин достигает максимальных величин,



Рис. 1. Карта-схема изучаемого участка 1 на 1 км

превышающих 30°. Его средние значения составляют порядка 10°.

Поверхность континентального склона имеет сложное строение и рассечена системой подводных каньонов, глубина вреза которых достигает 300 м.

Согласно геофизическим данным мощность рыхлых отложений (РО) в области шельфа и бровки континентального склона составляет порядка 20 м. На континентальном склоне РО распределены неравномерно. В донных областях каньонов и их отвершках толщина этих отложений незначительна: она не превышает 2 м на уровне 200-метровой изобаты в юго-восточном углу участка и на уровне 110-метровой изобаты в северной части. При этом мощность РО может увеличиваться до 10–15 м на гребнях, разделяющих каньоны.

Геологическое строение рассматриваемого участка было изучено по данным буровых скважин и станций опробования вдоль линий профилей 1–1 и 2–2 (по архивным материалам ООО «Питер Газ»), представленных на рис. 1. Эти профили имеют северо-восточное простирание, расположены в области бровки континентального склона и перпендикулярны ей, совпадают с направлениями падения подводных склонов. Один из них расположен в северной части участка и имеет длину 1 км, другой — в юго-восточной части и имеет протяженность 870 м. Северный профиль находится в верховьях основного русла подводного каньона, а юго-восточный — в верховьях одного из отвершков.

Указанные разрезы были изучены до глубины 28 м от поверхности дна. В их строении принимают участие грунты палеоцен-эоценового и четвертичного возраста.

Частные значения физических и физико-механических свойств грунтов подвергались статистической обработке по известной методике [4], результаты которой

представлены в табл. 1. Следует отметить, что некоторые идентичные по свойствам разновидности грунтов были встречены в геологических телах различного генезиса, поэтому для них статистическая обработка проводилась совместно.

Грунты палеоцен-эоценового возраста представлены глинами от тугопластичных до полутвердых, глинами от твердых до полутвердых и аргиллитами. Грунты четвертичного возраста — илом глинистым газонасыщенным, илом глинистым, глинами от текучепластичных до мягкопластичных, супесями пылеватыми, песками от пылеватых до мелких, суглинками и глинами тугопластичными, ракушечным грунтом.

Использованные авторами архивные значения свойств отложений включали в себя результаты определения пределов Аттерберга и гранулометрического состава согласно британскому стандарту [21], вследствие чего возникли затруднения при переводе названий грунтов. Для выделения их разновидностей была использована система, предложенная в работе [9], а также личный опыт авторов и архивные данные компании ООО «Питер Газ».

**Палеоцен-эоценовые грунты** представлены терригенным флишем, а именно глинами и аргиллитами с редкими и маломощными прослоями песчаников.

Глины от тугопластичных до полутвердых имеют среднее значение удельного недренированного сцепления  $c_{UU}$  по результатам трехосного сжатия по неконсолидированно-недренированной схеме, равное 121,8 КПа. Для глин от твердых до полутвердых характерно  $c_{UU}$ , составляющее 292,8 КПа, и среднее значение влажности  $W = 24,3\%$ . Аргиллиты по пределу прочности на одноосное сжатие можно определить как грунты от пониженной прочности до малопрочных со средним значением предела прочности на одноосное сжатие  $R_{сж} = 8,41$  МПа. По данным бурения угол падения палеоцен-эоценовых отложений составляет от 30 до 80°. Согласно работе [1] их слои падают в Ю-ЮЗ направлении. Максимальная вскрытая мощность отложений палеоцен-эоценового возраста составляет 19 м.

На породах терригенного флиша несогласно залегают **отложения четвертичного возраста**, представленные преимущественно илами, глинами и песками.

Таблица 1

| Нормативные показатели физических и физико-механических свойств грунтов* |         |        |                            |                              |                              |               |       |       |                 |           |                |                |                |               |        |
|--------------------------------------------------------------------------|---------|--------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|-------|-------|-----------------|-----------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------|
| Грунт                                                                    | Возраст | W, %   | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup> | $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup> | e, безр. азм. | PL, % | LL, % | PI = LL - PL, % | $I_p$ , % | $c_{TV}$ , КПа | $c_{LV}$ , КПа | $c_{UV}$ , КПа | $\phi$ , град | c, КПа |
| Ил глинистый газонасыщенный                                              | Q       | 108,20 | 1,40                       | 0,67                         | 2,68                         | 2,97          | 35,69 | 89,13 | 53,44           | 41,96     | 4,5            | 4,5            | -              | -             | -      |
| Ил глинистый                                                             | Q       | 56,92  | 1,63                       | 1,04                         | 2,69                         | 1,59          | 26,46 | 58,46 | 32,00           | 19,91     | 7,5            | 6,1            | -              | -             | -      |
| Глины от текучепластичных до мягкопластичных                             | Q       | 44,17  | 1,77                       | 1,23                         | 2,67                         | 1,18          | 25,83 | 59,83 | 34,00           | 21,94     | 25,4           | 21,5           | 23,0           | -             | -      |
| Супеси пылеватые                                                         | Q       | 34,50  | 1,76                       | 1,31                         | 2,72                         | 1,07          | 22,00 | 39,00 | 17,00           | 4,52      | 28,3           | 7,0            | -              | -             | -      |
| Пески от пылеватых до мелких                                             | Q       | 27,00  | 1,94                       | 1,53                         | 2,73                         | 0,79          | -     | -     | -               | -         | -              | -              | -              | 34            | 12,4   |
| Суглинки и глины тугопластичные                                          | Q       | 27,00  | 2,00                       | 1,58                         | 2,68                         | 0,70          | 25,67 | 50,00 | 24,33           | 12,07     | 116,6          | -              | 198,0          | -             | -      |
| Ракушечный грунт                                                         | Q       | 115,00 | 1,97                       | 0,92                         | 2,79                         | 2,04          | -     | -     | -               | -         | -              | -              | -              | 37            | 17,0   |
| Глины от тугопластичных до полутвердых                                   | Pg      | 31,52  | 1,89                       | 1,44                         | 2,68                         | 0,86          | 28,82 | 62,30 | 33,48           | 21,47     | 114,3          | 87,0           | 121,8          | -             | -      |
| Глины от твердых до полутвердых                                          | Pg      | 24,28  | 2,02                       | 1,63                         | 2,68                         | 0,65          | 29,50 | 82,00 | 52,50           | 40,88     | 112,7          | -              | 292,8          | -             | -      |
| Аргиллиты                                                                | Pg      | 17,73  | 2,09                       | 1,78                         | 2,73                         | 0,54          | -     | -     | -               | -         | -              | -              | -              | -             | -      |

\* W — природная влажность грунта;  $\rho$  — плотность грунта;  $\rho_d$  — плотность сухого грунта;  $\rho_s$  — плотность частиц грунта; e — коэффициент пористости; PL — предел пластичности Аттерберга (нижний предел пластичности, граница раскатывания) по ASTM D4318; LL — предел текучести Аттерберга (верхний предел пластичности) по ASTM D4318; PI — число (коэффициент) пластичности по ASTM D4318;  $I_p$  — число пластичности по ГОСТ 25100-95 (рассчитанное по эмпирической зависимости из работы [10]);  $c_{TV}$ ,  $c_{LV}$ ,  $c_{UV}$  — недренированное удельное сцепление, определенное с помощью испытаний микрокрылаткой, лабораторной крылаткой и трехосных испытаний по неконсолидированно-недренированной схеме соответственно;  $\phi$ , c — параметры прочности (угол внутреннего трения и удельное сцепление соответственно), определенные при трехосном сжатии.



Максимальная вскрытая мощность этих отложений составила 19 м.

*Суглинки и глины тугопластичные* в основном покрывают континентальный склон и в местах расположения некоторых станций опробования и скважинах замещаются глинистыми конгломератами (галькой тугопластичной глины и аргиллита в глинистом матриксе). Также в этих отложениях встречаются редкие и тонкие прослои песка и битой ракушки. Конгломераты указывают на оползневой генезис этих отложений [1], а тонкие прослои песка и битой ракушки (мощностью до 10 см) свидетельствуют о периодическом возникновении в прошлом подводных гравитационных потоков на данном участке. Эти грунты являются крайне неоднородными, их свойства в пределах указанного слоя могут изменяться в широких пределах и имеют случайный характер. Свойства обломков различного размера и состава существенно отличаются от свойств глинистого матрикса. Суглинки и глины тугопластичные характеризуются низкой влажностью (в среднем 27%), сравнительно высокой плотностью (в среднем 2 г/см<sup>3</sup>) и высоким недренированным сцеплением  $c_{TV}$  по результатам определений с помощью микрокрыльчатки (116,6 КПа).

*Ракушечные грунты* встречены в юго-восточной части рассматриваемого участка. Эти отложения залегают в области шельфа и бровки континентального склона непосредственно на породах терригенного флиша, а также перекрывают толщу песков. В большинстве случаев они представляют собой битую ракушку. Вследствие сложностей, связанных с определением физических и физико-механических свойств таких грунтов, они оказались неопробованными, поэтому в расчетах устойчивости склонов были использованы характеристики аналогичных грунтов, полученные для района Кавказского шельфа Черного моря, расположенного к юго-востоку от рассматриваемого участка [5].

*Пески мелкие и пылеватые* встречены в области шельфа и бровки континентального склона в юго-западной части рассматриваемого участка. Они формируют погребенную аккумулятивную форму, напоминающую бар или банку. Среднее значение их влажности составляет 27%. Эти пески характеризуются высоким содержанием карбонатов (в среднем 67%). В расчетах устойчивости склонов для данных грунтов также использовались физико-механические характеристики, определенные для песков из смежного района Черного моря.

*Супеси пылеватые* локально распространены на рассматриваемом участке и приурочены к аккумулятивному песчаному телу, расположенному в области шельфа в юго-западной части участка. Они характеризуются консистенцией от текучей до пластичной.

*Глины от текучепластичных до мягкопластичных* широко распространены как в области шельфа, так и на континентальном склоне. В области континентального склона эти отложения характеризуются оползневым генезисом. В них встречаются обломки полускальных пород, тугопластичных и полутвердых глин различной степени окатанности, редко можно обнаружить тонкие прослои битой ракушки и песка. Среднее значение влажности этих глин составляет 44,2%. Их среднее сопротивление недренированному сдвигу  $c_{LV}$  по результатам определения лабораторной крыльчаткой равно 21,5 КПа.

*Илы глинистые* почти сплошным чехлом покрывают всю территорию рассматриваемого участка. Они характеризуются высокой влажностью (в среднем 56,9%), низкой плотностью (в среднем 1,63 г/см<sup>3</sup>), средним коэффициентом пористости (1,59), содержанием органического вещества 5,3% и карбонатов 29,8%.

*Илы глинистые газонасыщенные* имеют небольшую мощность (максимум 2,7 м), но широко распространены как в области шельфа, так и на континентальном склоне. Они характеризуются аномально высокой влажностью (в среднем 108,2%), низкой плотностью (1,41 г/см<sup>3</sup>), высоким коэффициентом пористости (2,97) и низким сопротивлением недренированному сдвигу  $c_{LV}$  по результатам определения лабораторной крыльчаткой (4,5 КПа).

Среди опасных геологических и инженерно-геологических процессов на исследуемом участке следует отметить сейсмические (поскольку рассматриваемая территория является высокосейсмичной) и оползневые (предположительно).

### Методика расчета устойчивости подводных склонов

В настоящей работе расчет устойчивости подводных склонов проводился на одномерных и двухмерных моделях с использованием методов предельного равновесия. В основе этих методов лежит расчет коэффициента устойчивости (запаса) вдоль поверхности скольжения.

Коэффициент устойчивости  $K_y$  представляет собой либо отношение суммы удерживающих оползневое тело сил ( $\sum F_{res}$ ) к сумме сдвигающих его сил ( $F_{mob}$ ), либо отношение сумм моментов этих сил ( $\sum M_{res}$  и  $\sum M_{mob}$  соответственно) [7]:

$$K_y = \frac{\sum F_{res}}{\sum F_{mob}} = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{mob}}. \quad (1)$$

Использованная методика расчета предполагала, что при значении коэффициента устойчивости 1,2 склон находится в состоянии предельного равновесия.

В случае решения двухмерной задачи в момент предельного равновесия должно выполняться следующее основное условие: тело находится в равновесии только в том случае, если суммы проекций всех действующих на него сил на любую ось (горизонтальную или вертикальную) и сумма моментов этих же сил относительно центра вращения равны нулю:

$$\sum F_H = 0; \sum F_V = 0; \sum M_0 = 0. \quad (2)$$

Большинство методов оценки устойчивости склонов основано на том, что формирование оползня на склоне происходит в результате смещения грунтов по поверхности скольжения в соответствии с теорией прочности Кулона — Мора.

В процессе расчета оползневое тело делится на фрагменты, которые снизу ограничены поверхностью скольжения (или сдвига), сверху — дневной поверхностью, а справа и слева — вертикальными плоскостями (или отрезками в случае плоской задачи).

В момент предельного равновесия вдоль поверхности скольжения действует зависимость:

$$s = \sigma' \cdot \tan \varphi' + c', \quad (3)$$

где  $s$  — сопротивление грунта сдвигу, КПа;  $c'$  — удельное сцепление, КПа;  $\varphi'$  — эффективный угол внутреннего трения, град.;  $\sigma'$  — эффективное нормальное напряжение на поверхности скольжения во время обрушения, КПа.

Вертикальные фрагменты, составляющие оползневое тело, взаимодействуют между собой: со стороны фрагмента, расположенного выше, рассматриваемый фрагмент испытывает давление, а со стороны расположенного ниже он встречает сопротивление. Величины и направления сил взаимодействия между фрагментами неизвестны, поэтому в каждом методе величины этих сил определяются различными способами.

В настоящей работе для расчета устойчивости склонов были выбраны метод Терцаги и метод общего предельного равновесия (метод GLE — General Limit Equilibrium).

При использовании метода Терцаги оползневое тело разбивается на вертикальные фрагменты, а равнодействующая сил взаимодействия каждого фрагмента с двумя соседними направлена по касательной к круглоцилиндрической поверхности скольжения.

При расчете коэффициента устойчивости склона  $K_y$  (безразмерн.) для статических условий по методу Терцаги было использовано следующее соотношение:

$$K_y = \frac{c \cdot \beta + p' \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi}{p' \cdot \sin \alpha}, \quad (4)$$

где  $K_y$  — коэффициент устойчивости склона, — вес фрагмента, взвешенного в воде, Н;  $\beta$  — длина основания фрагмента, м;  $\alpha$  — уклон основания фрагмента, град.;  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта, град.;  $c$  — удельное сцепление грунта, Па.

При учете сейсмического воздействия (о котором будет рассказано ниже) формула для расчета  $K_y$  выглядит следующим образом:

$$K_y = \frac{c \cdot \beta + (p' + k_v \cdot p) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \varphi}{(p' + k_v \cdot p) \cdot \sin \alpha + k_h \cdot p \cdot \cos \alpha}, \quad (5)$$

где  $\beta$  — вес фрагмента при природной влажности грунта, Н;  $k_h$  — безразмерный коэффициент сейсмичности для горизонтального сейсмического ускорения;  $k_v$  — безразмерный коэффициент сейсмичности для вертикального сейсмического ускорения.

В настоящей работе метод Терцаги вследствие его простоты был применен при проведении одномерного расчета устойчивости в программе Microsoft Office Excel. Одномерный расчет предполагает, что поверхность скольжения параллельна поверхности модельного склона и что вместо реальных инженерно-геологических разрезов при оценке устойчивости используются модельные разрезы. Использование последних может быть оправданным, если значения длины и ширины оползня превышают его мощность на несколько порядков, вследствие чего модельный разрез можно рассматривать как бесконечный. При таком подходе можно оценивать устойчивость не всего оползневое тело, а только одного его фрагмента, опирающегося на основание единичной длины. Использование одномер-

ной схемы может быть оправданным также при проведении поверочных расчетов.

При использовании компьютерной техники одномерный расчет не является трудоемким и позволяет оценивать устойчивость при изменении значений отдельных параметров. В данной работе он был выполнен при различных значениях крутизны модельного склона, мощности смещаемых отложений и сейсмических коэффициентов.

Минимальная мощность сползающих отложений на модельных разрезах составила 1 м, а максимальная — 20 м, что соответствует минимальному и максимальному значениям мощности рыхлых отложений по данным сейсмического профилирования на рассматриваемом участке Кавказского шельфа. Уклоны модельных склонов находились в диапазоне от 1° (среднего уклона шельфа) до 40° (максимального уклона в области бровки континентального склона).

При использовании метода GLE должны соблюдаться условия как равновесия моментов, так и равновесия сил. Это означает, что для расчета коэффициента устойчивости склона используются два соотношения — удовлетворяющее равновесию сил и удовлетворяющее равновесию моментов. В методах предельного равновесия эта задача является статически определенной для каждого отдельного фрагмента, однако в отношении сил, действующих на границах фрагментов, возникает необходимость в принятии допущений. Решение задачи об устойчивости склона в целом методами предельного равновесия является статически неопределенным и, чтобы «замкнуть» систему уравнений и определить направление результирующей силы взаимодействия между фрагментами, в методе GLE вводится соотношение, предложенное Моргенштерном и Прайсом [24]:

$$F_N = F_t \cdot f(x), \quad (6)$$

где  $F_t$  — касательные составляющие сил взаимодействия, Н;  $F_N$  — нормальные составляющие сил взаимодействия, Н;  $f(x)$  — функциональная зависимость между  $F_t$  и  $F_N$ ;  $\lambda$  — доля используемой функции, д. ед.

Вид  $f(x)$  может быть различным. В настоящей работе была выбрана полусинусоидальная зависимость. Применение уравнения (6) делает задачу расчета устойчивости склона по методу GLE статически определенной.

Последние исследования И.К. Фоменко [17] показывают, что метод GLE отличается высокой точностью и результаты оценки устойчивости по нему сопоставимы с итогами расчета методом конечных элементов.

Метод GLE использовался в данной работе при проведении двухмерного расчета с использованием инженерно-геологических разрезов в программах SLOPE/W 2007 и Slide.

### **Построение расчетной схемы устойчивости подводных склонов и определение прочностных свойств грунтов**

Под водой большинство грунтов (особенно дисперсных) находится в состоянии полного водонасыщения, поэтому при расчетах устойчивости подводных склонов

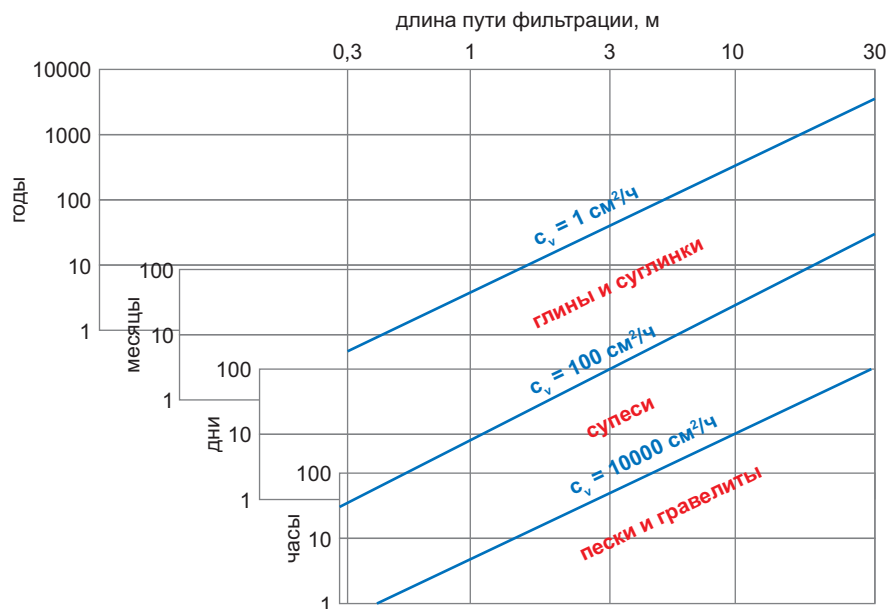


Рис. 2. Схема для определения времени, необходимого для дренирования различных грунтов, где  $C_v$  — коэффициент консолидации [22]

важно определить, в каких условиях находится массив грунта — дренированных или недренированных.

Если нагрузка на грунт передается медленно или прошло значительное время после ее изменения, отток поровой воды из массива в окружающее пространство будет обеспечен и условия будут дренированными. В этом случае поровое давление не будет отличаться от гидростатического и нагрузка на грунт будет восприниматься только через его скелет. Следовательно, поведение грунта будет описываться прочностными характеристиками, определенными через эффективные напряжения.

При кратковременном нагружении массива грунта отток из него воды будет затруднен, вследствие чего поровое давление возрастет и будет отличаться от гидростатического. Такие условия можно считать недренированными. В этом случае нагрузка на грунт будет передаваться не только через его скелет, но и через поровую воду. Вследствие этого для расчета устойчивости в недренированных условиях необходимо использовать прочностные параметры, определенные через полные напряжения.

Дренирование массива зависит в первую очередь от времени, во вторую — от фильтрационных характеристик слагающих его грунтов и, наконец, от его размеров. Время, необходимое для перехода от недренированных условий к дренированным, для различных типов грунтов можно оценить по диаграмме, представленной на рис. 2.

В зависимости от условий (дренированных или недренированных) для анализа устойчивости подводных склонов может быть использовано три подхода, то есть проведение расчетов тремя путями: (1) через эффективные напряжения; (2) через полные напряжения; (3) с использованием недренированного сцепления (последний подход представляет собой разновидность расчета через полные напряжения при наличии в разрезе глинистых грунтов) [18].

В распоряжении авторов настоящей статьи из прочностных характеристик были только значения недренированного сцепления глинистых грунтов, то есть

расчетная схема предполагала недренированные условия. Вследствие того что рассматриваемый район является сейсмически активным и массивы грунтов в его пределах находятся под периодическим воздействием сейсмических нагрузок, выполнение расчета в недренированных условиях является обоснованным.

#### Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов

Расчет устойчивости склонов с использованием как одномерных, так и двухмерных моделей проводился с учетом сейсмического воздействия. Во время землетрясения возникают инерционные силы, которые действуют в горизонтальном и вертикальном направлениях и приложены к центру масс каждого отсека. Инерционные силы могут быть определены следующим образом:

$$F_h = \frac{a_h}{g} \cdot p = k_h \cdot p; \quad (7)$$

$$F_v = \frac{a_v}{g} \cdot p = k_v \cdot p, \quad (8)$$

где  $F_h$  — инерционная сила в горизонтальном направлении, Н;  $F_v$  — инерционная сила в вертикальном направлении, Н;  $a_h$  — горизонтальное сейсмическое ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $a_v$  — вертикальное сейсмическое ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Следовательно, для расчетов устойчивости склонов при сейсмических воздействиях в качестве исходных данных необходимо знать пиковые сейсмические ускорения, характерные для исследуемой территории [26].

Для расчета коэффициентов  $k_h$  и  $k_v$  использовался подход, изложенный в Еврокоде [25]:

$$k_h = 0,5 \cdot k_s \cdot \frac{a_g}{g} = 0,5 \cdot 1,6 \cdot \frac{a_g}{g}; \quad (9)$$

Таблица 2

| Значения ускорений и коэффициентов сейсмичности, использованные в расчетах устойчивости склонов |                                               |         |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Характеристика                                                                                  | Интенсивность сейсмического воздействия, балл |         |         |         |
|                                                                                                 | 7                                             | 8       | 9       | 10      |
| Сейсмическое ускорение, выбранное для расчетов (проектное), м/с <sup>2</sup>                    | 1                                             | 3       | 4       | 8       |
| Коэффициент сейсмичности $k_h$                                                                  | 0,09                                          | 0,27    | 0,36    | 0,72    |
| Коэффициент сейсмичности $k_v$                                                                  | 0,0297                                        | 0,0891  | 0,1188  | 0,2376  |
|                                                                                                 | –0,0297                                       | –0,0891 | –0,1188 | –0,2376 |

$$k_v = \pm 0,33 \cdot k_h \quad (10)$$

где  $a_g$  — ускорение для 2-й категории грунтов по сейсмическим свойствам, м/с<sup>2</sup> [15];  $k_s$  — коэффициент, зависящий от типа грунта (для морских дисперсных грунтов  $k_s = 1,6$  [23]).

В российской практике сейсмического микрорайонирования используется не количественная оценка интенсивности землетрясений (в ускорениях), а качественная (в баллах по шкале MSK-64). Согласно СНиП II-7-81\* [14] для рассматриваемого в данной статье участка характерны следующие значения интенсивности по шкале MSK-64: 8 баллов при периоде повторяемости сотрясений  $T = 500$  лет; 9 баллов при  $T = 1000$  лет; 10 баллов при  $T = 5000$  лет. Поэтому расчет устойчивости был выполнен авторами для сейсмических сотрясений силой от 7 до 10 баллов.

Так как для расчета необходимы величины интенсивности не в баллах, а в ускорениях, для перехода были использованы данные, представленные в СНиП 2.05.06-85\* [15]. Землетрясениям интенсивностью 7, 9 и 10 баллов соответствуют сейсмические ускорения 100, 400 и 800 см/с<sup>2</sup> соответственно. Согласно работе [20] для рассматриваемого участка характерны ускорения в интервале 0,2–0,3g (м/с<sup>2</sup>) при  $T = 500$  лет (что соответствует интенсивности 8 баллов). Придерживаясь консервативного подхода, авторы выбрали большее (0,3g, м/с<sup>2</sup>) значение ускорения.

Таким образом, были получены значения ускорений и коэффициентов сейсмичности в вертикальном и горизонтальном направлениях (табл. 2), которые в дальнейшем использовались в расчетах устойчивости склонов.

## Результаты расчетов устойчивости

Как упоминалось выше, для рассматриваемого участка из прочностных характеристик в распоряжении авторов статьи были только значения недренированного сцепления глинистых грунтов, поэтому одномерный расчет был выполнен только для глинистых грунтов с недренированным сцеплением.

### Одномерные модели

Результаты одномерных расчетов показывают, что наименее устойчивыми являются отложения, представленные *илами глинистыми газонасыщенными*. Если обратиться к инженерно-геологическим разрезам рассматриваемого участка, можно заметить, что эти

отложения залегают на поверхности и их мощность не превышает 1,9 м.

Согласно результатам расчетов при мощности илов глинистых газонасыщенных, равной 2 м, массив, сложенный данными грунтами, будет находиться в состоянии предельного равновесия при уклоне склона 26°. Это означает, что в области континентального склона, где значения уклона превышают 30°, эти отложения будут неустойчивыми. Можно предположить, что глинистые газонасыщенные илы могут залежать лишь в области шельфа и на участках континентального склона с уклонами менее 26°, а на участках с большими уклонами они будут отсутствовать. По результатам расчетов при сейсмическом воздействии интенсивностью 7 баллов при мощности слоя этих отложений 2 м они будут находиться в состоянии предельного равновесия при уклоне 7°, что соответствует уклону в области бровки континентального склона. При землетрясениях интенсивностью более 7 баллов они будут неустойчивыми при любых уклонах.

*Глинистые илы* являются на изучаемой территории наиболее распространенными отложениями. Их мощность на рассматриваемом участке может достигать 11,5 м. При их толщине 2, 5, 10 и 20 м массив будет находиться в состоянии предельного равновесия при уклоне 29, 11, 5 и 2° соответственно (рис. 3). Результаты расчетов показывают, что в статических условиях эти отложения в северной части участка, где они имеют максимальную мощность, находятся в состоянии предельного равновесия еще в области шельфа. В области же бровки и самого континентального склона они неустойчивы (в противном случае их мощность незначительна, то есть  $\leq 1$  м). В других зонах исследуемого участка, где глинистый ил имеет меньшую мощность, он, так же как и глинистый газонасыщенный ил, может залежать стабильно в области шельфа и на относительно пологих участках континентального склона, причем в области склона толщина его слоя не может превышать 5 м.

При расчете с учетом сейсмического воздействия при интенсивности землетрясения 10 баллов во всем диапазоне расчетных значений мощности и уклона данные отложения являются неустойчивыми. При землетрясениях интенсивностью 7 (рис. 4), 8 и 9 баллов при небольшой мощности отложений (2 м, редко 1 м) модельные склоны находятся в состоянии, близком к предельному равновесию, как на шельфе, так на континентальном склоне. При большей мощности эти грунты неустойчивы.

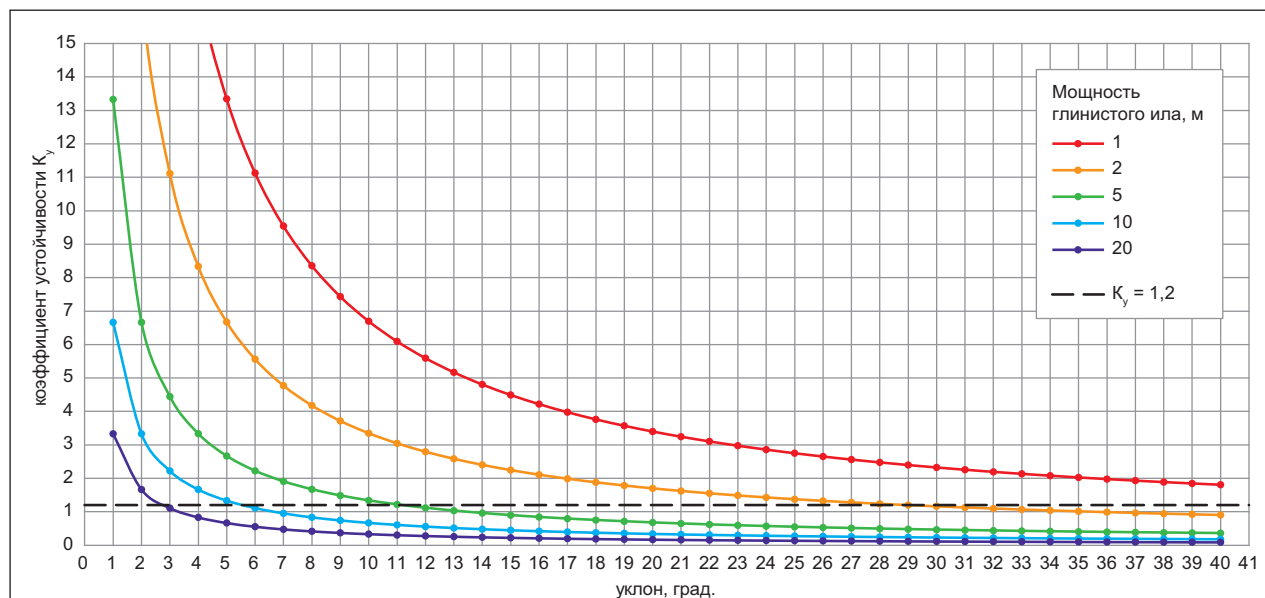


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента устойчивости  $K_y$  от уклона для модельных склонов, сложенных глинистыми илами с глубиной расположения поверхности скольжения 1, 2, 5, 10 и 20 м при расчетах с недренарованным сцеплением

Глины от текучепластичных до мягкопластичных являются более устойчивыми по сравнению с отложениями, рассмотренными выше. Их мощность на изучаемом участке превышает 4,5 м. Подошва сложенного этими грунтами слоя, вскрытая скважиной в северной части участка, расположена на глубине 16 м, поэтому при анализе результатов расчета устойчивости необходимо учитывать мощность смещаемых отложений приближающуюся к этому значению. Одномерный расчет устойчивости показывает, что при толщине 1 и 2 м они будут устойчивыми во всем диапазоне расчетных значений уклона. При мощности 5, 10 и 20 м предельное равновесие этих отложений достигается при уклоне 34, 16 и 8° соответственно. В статических условиях глины от текучепластичных до мягкопластичных могут находиться в устойчивом состоянии в области шельфа. На бровке и на континентальном склоне они устойчивы при мощности порядка 10 м и меньше. Расчет с учетом сейсмического воздействия показывает, что при сейсмических нагрузках

интенсивностью 9 и 10 баллов эти отложения неустойчивы при мощности 2, 5, 10 и 20 м, а при толщине 1 м (редко 2 м) они находятся в состоянии предельного равновесия.

Для супесей пылеватых на рассматриваемом участке характерна мощность не более 3 м. Однако данные грунты могут слагать самую нижнюю часть разреза четвертичных отложений. Они наблюдаются в основном в области шельфа и бровки континентального склона. Подошва слоя этих отложений находится на глубине 19 м и более. В статических условиях при мощности 1 и 2 м они находятся в устойчивом состоянии во всем диапазоне уклонов. При мощности 5, 10 и 20 м они находятся в состоянии предельного равновесия при уклоне 35, 16 и 8° соответственно. Эти результаты означают, что в северной части участка в области бровки континентального склона, где уклоны начинают приближаться к 8°, массив четвертичных отложений находится в состоянии, близком к предельному равновесию. В южной части участка супесчаные отложения

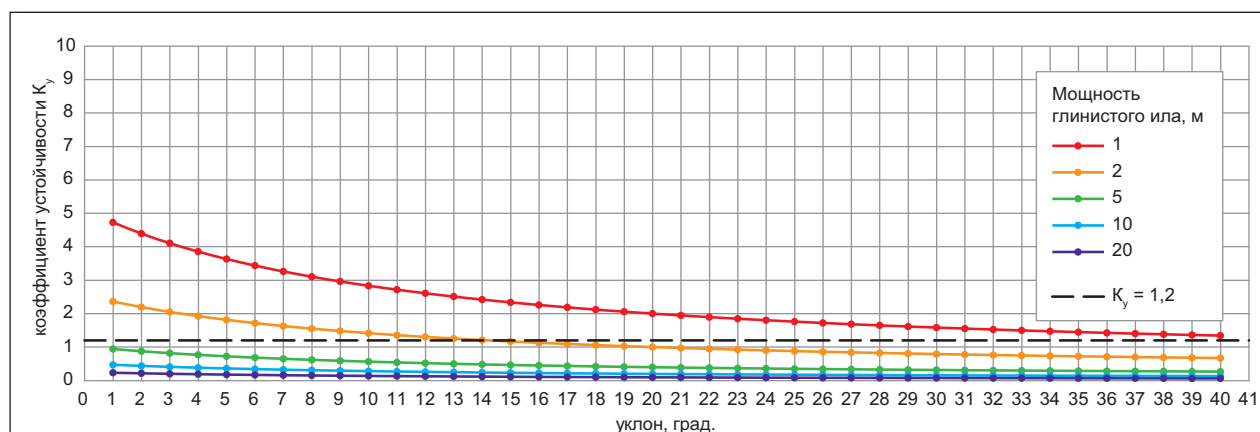


Рис. 4. График зависимости коэффициента устойчивости  $K_y$  от уклона для модельных склонов, сложенных глинистыми илами с глубиной расположения поверхности скольжения 1, 2, 5, 10 и 20 м при расчетах с недренарованным сцеплением с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов при положительном значении коэффициента сейсмичности для вертикального сейсмического ускорения

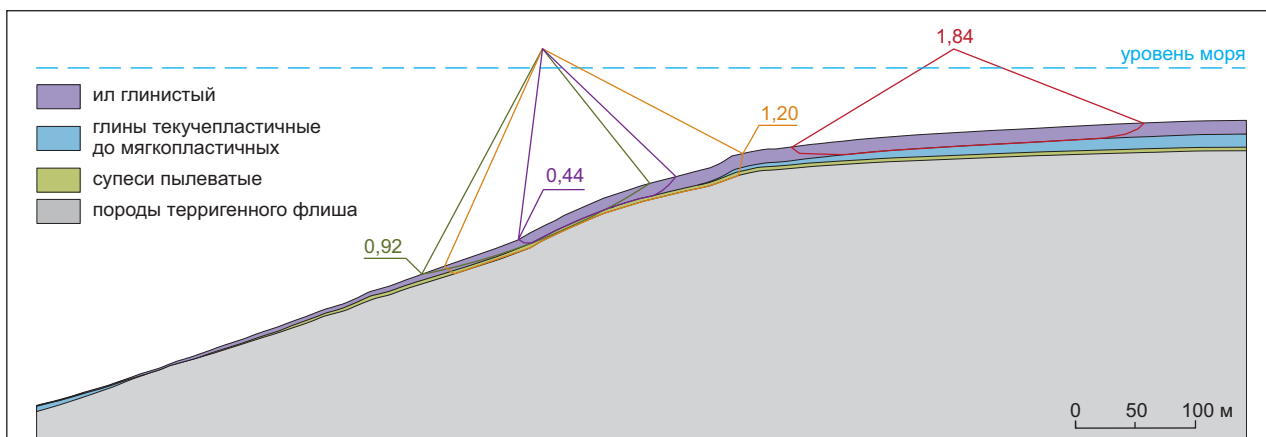


Рис. 5. Результаты расчетов устойчивости (коэффициенты устойчивости) для статических условий по линии разреза 1–1 (см. рис. 1)

залегают только в области шельфа и на небольших глубинах, поэтому находятся в устойчивом состоянии.

По результатам расчетов с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 9 и 10 баллов, данные отложения являются неустойчивыми при мощности 2–20 м. При толщине 1 м (редко 2 м) они находятся в состоянии, близком к предельному равновесию. При интенсивности сотрясений 7 и 8 баллов при мощности 1 и 2 м данные отложения устойчивы, при толщине 5 и 10 м они находятся в состоянии, близком к предельному равновесию, а при 20 м являются неустойчивыми. При сейсмических нагрузках даже в южной части участка, где эти грунты залегают на глубине порядка 10 м, их можно рассматривать как потенциально оползнеопасные.

Суглинки и глины тугопластичные распространены только в области континентального склона при глубине расположения подошвы слоя около 6,5 м. В статических условиях для расчетных интервалов значений уклона и мощности эти отложения неустойчивы лишь при мощности 20 м и при уклоне, превышающем 30°. Анализ с учетом сейсмического воздействия показывает, что при мощности 1, 2 и даже 5 м они устойчивы. При этом в условиях рассматриваемого участка данные отложения находятся в состоянии предельного равновесия (или являются неустойчивыми) только при интенсивности сейсмического воздействия выше 8 баллов.

### Двухмерные модели

Основой для расчетов устойчивости с использованием двухмерных моделей являлись инженерно-геологические разрезы, совпадающие с профилями, описание которых представлено выше. Для расчетов использовались нормативные характеристики грунтов, полученные в результате статистической обработки. Анализ устойчивости на двухмерных моделях, так же как одномерный, выполнялся для статических условий и с учетом сейсмического воздействия.

Напомним, что согласно результатам одномерного расчета формирование оползней возможно в отложениях и континентального склона, и шельфа. В ходе же проведения двухмерного анализа были обнаружены существенные различия в их устойчивости. Для получения полноценного представления об устойчивости рассматриваемых подводных склонов оценка устойчи-

вости шельфа и континентального склона должна проводиться раздельно.

### Расчеты для статических условий

По результатам расчетов по недренированной схеме для статических условий область шельфа находится в устойчивом состоянии. Минимальные коэффициенты устойчивости приурочены к отложениям, представленным илом глинистым и илом глинистым газонасыщенным. Поверхность предполагаемого смещения для них имеет  $K_s = 1,84$  (рис. 5), что свидетельствует об устойчивом положении массива.

В области континентального склона формирование оползней может быть связано с илами, глинами от текучепластичных до мягкопластичных и пылеватыми супесями. Необходимо отметить, что поверхности предполагаемого смещения, находящиеся в илах, характеризуются крайне низкими значениями коэффициента устойчивости (минимальное из них составляет 0,44). Это может свидетельствовать о невозможности нахождения этих отложений на наиболее крутых участках континентального склона.

Поверхности предполагаемого смещения, находящиеся в супесчаных отложениях (по линии разреза 1–1) (см. рис. 1), характеризуются коэффициентами устойчивости 0,92 и выше. При этом данные поверхности очерчивают снизу тела толщиной около 12 м и протяженностью до 190 м. Поверхности же, характеризующиеся состоянием предельного равновесия в этих грунтах ( $K_s = 1,2$ ), формируют тела протяженностью до 250 м и захватывают полную мощность четвертичных отложений в области континентального склона.

Формирование на континентальном склоне в статических условиях оползней в отложениях, представленных глинами от текучепластичных до мягкопластичных, суглинками и глинами тугопластичными, а также песчаными и ракушечными грунтами, практически невозможно вследствие высоких значений коэффициентов устойчивости поверхностей смещения, находящихся в этих отложениях.

По результатам расчетов для статических условий можно сделать следующие выводы: шельф находится в устойчивом состоянии, а в области склона поверхность скольжения будет заключена в отложениях, представленных илом глинистым и илом глинистым газо-

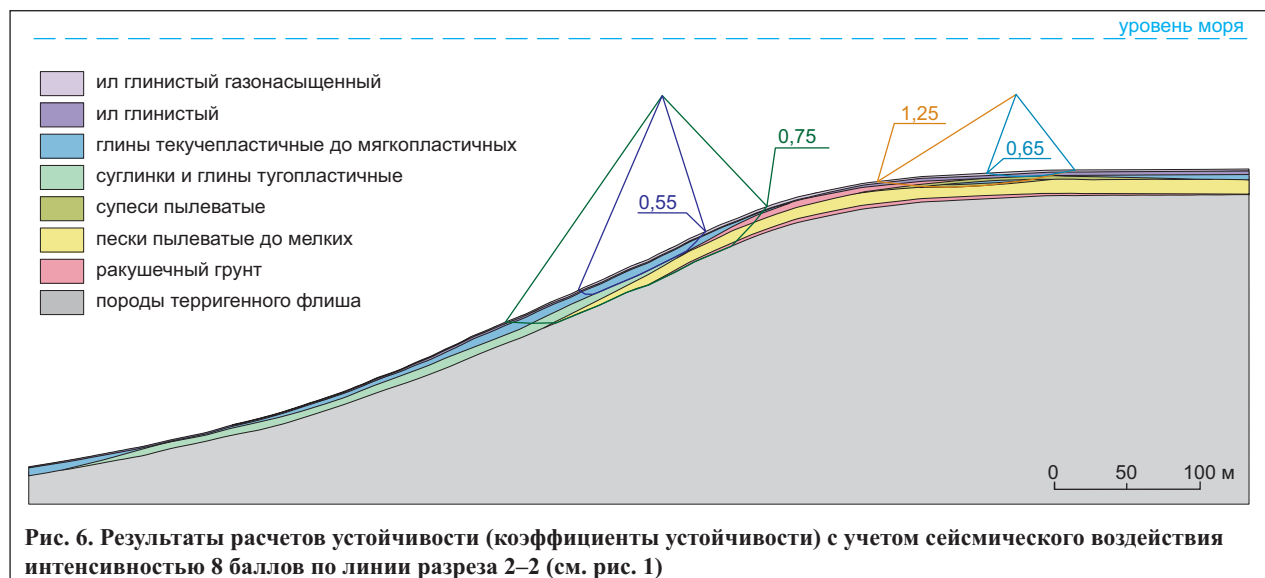


Рис. 6. Результаты расчетов устойчивости (коэффициенты устойчивости) с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов по линии разреза 2–2 (см. рис. 1)

насыщенным. Формирование оползней в консолидированных отложениях (за исключением супесчаных) маловероятно вследствие высокой прочности последних.

#### Расчеты с учетом сейсмических воздействий

Результаты оценки устойчивости подводных склонов с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов показывают, что поверхности предполагаемых смещений *вдоль профиля 1–1* (см. рис. 1) как на шельфе, так и на континентальном склоне характеризуются низкими коэффициентами устойчивости.

На *шельфе* поверхность предполагаемого смещения с минимальным значением коэффициента устойчивости (0,4) заключена в илах глинистых и залегает на глубине порядка 10–12 м. Возможно возникновение оползней и в отложениях, залегающих ниже, — супесях и глинах от текучепластичных до мягкопластичных. В таком случае неустойчивым будет весь массив рыхлых отложений. При этом согласно результатам расчетов возможно возникновение оползневых тел протяженностью до 280 м и мощностью до 20 м, характеризующихся коэффициентами устойчивости около 0,8.

Отложения, залегающие на протяжении всего *континентального склона* в северной части рассматриваемого участка, при сейсмических нагрузках 7 баллов и выше будут неустойчивыми. При этом следует ожидать массового проявления оползней, захватывающих рыхлые отложения на полную мощность.

Для профиля, расположенного на *юго-востоке* рассматриваемого участка (по линии *разреза 2–2*) (см. рис. 1), характерно устойчивое состояние отложений на шельфе даже при сейсмической нагрузке интенсивностью 7 баллов и неустойчивое на континентальном склоне при нагрузке 7 баллов и выше.

В области *шельфа* поверхность с минимальным коэффициентом устойчивости (1,4) находится в илах. При сейсмической нагрузке 8 баллов можно наблюдать множество поверхностей скольжения с коэффициентом устойчивости ниже 1,2 (при минимальном  $K_y = 0,65$ ) в илах и супесях. При этом песчаные грунты являются устойчивыми. Песчаные и ракушечные отложения становятся неустойчивыми при сейсмических нагрузках 9 баллов и выше — согласно результатам расчетов возможно формирование оползневых тел протяженностью

до 170 м, захватывающих четвертичные отложения на полную мощность (около 19 м).

В *юго-восточной* части участка в области континентального склона глинистые разновидности грунтов являются неустойчивыми при сейсмических нагрузках 7 баллов и выше. Основным деформируемым горизонтом являются глины от текучепластичных до мягкопластичных. Суглинки и глины тугопластичные, а также песчаные грунты при 7-балльных нагрузках находятся в устойчивом состоянии. Песчаные и глинистые грунты тугопластичной консистенции теряют устойчивость при 8 баллах и выше (поверхность предполагаемого смещения в этих отложениях с минимальным коэффициентом устойчивости 0,75 очерчивает тело протяженностью около 180 м и мощностью примерно 18 м) (рис. 6).

При моделировании нагрузок от землетрясений интенсивностью 9 и 10 баллов следует, что на рассматриваемом участке возможно формирование оползневых тел протяженностью более 180 м.

Таким образом, сейсмическая нагрузка интенсивностью 8 баллов для песчаных отложений и глинистых грунтов тугопластичной консистенции является критической.

#### Выводы

Необходимость исследования оползней на подводных склонах Черного моря продиктована той опасностью, которую они представляют для линейных сооружений.

Природные условия рассмотренного в статье участка свидетельствуют о возможном развитии здесь подводных оползневых процессов. По данным бурения и опробования в разрезе встречаются глинистые конгломераты, тонкие прослои битой ракушки и песка, которые указывают на периодическое возникновение в прошлом подводных гравитационных потоков.

Наиболее важным вопросом исследования является оценка устойчивости Кавказского шельфа Черного моря. Из факторов, способных повлиять на устойчивость склона на рассматриваемом участке, следует выделить возможные сейсмические воздействия, поскольку данная территория является высокосейсмичной.

Расчеты с использованием одномерных моделей позволили выявить разновидности грунтов, которые могут выступать в роли основных деформируемых горизонтов. Такими грунтами являются различные илы. Расчеты на двухмерных моделях позволили определить контуры оползневых тел и оценить масштабность возможного развития оползневых процессов.

Двухмерный анализ показывает, что в статических условиях область шельфа находится в устойчивом состоянии, а в области континентального склона возможно формирование оползней в отложениях, представленных илами и супесями.

Из результатов расчетов с учетом сейсмических воздействий следует, что существуют принципиальные различия в устойчивости массивов, сложенных

только глинистыми грунтами и сложенных преимущественно песчаными отложениями. Так, разрез в северной части участка, сложенный глинистыми разновидностями грунтов, теряет устойчивость при 7-балльных нагрузках. Для разреза в юго-восточной части, представленного преимущественно песчаными грунтами, критическое значение интенсивности землетрясения составляет 8 баллов.

При проектировании подводных сооружений в области внешнего шельфа, бровки и континентального склона восточного сектора Черного моря необходимо учитывать возможное влияние подводных гравитационных процессов, которые могут формироваться даже при незначительных воздействиях на массивы грунтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельский А.Д. Оползание осадков на дне Черного моря и геологическое значение этого явления // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 1930. Т. 8. Вып. 1-2. С. 32–80.
2. Роджерс Д. Богатства Черного моря // Нефть и газ. 2010. № 11. С. 94–99.
3. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
4. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Минстрой России, МНТКС, 1996.
5. Ионов В.Ю., Калинин Э.В. Оползни на Кавказском шельфе Черного моря и оценка их устойчивости // Концептуальные проблемы литологических исследований в России: материалы 6-го Всероссийского литологического совещания, Казань, 26-30 сентября 2011 г. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2011. Т. 1. С. 351–354.
6. Казанцев Р.А., Кругляков В.В. Гигантский оползень на дне Черного моря // Природа. 1998. № 10. С. 86–87.
7. Калинин Э.В. Инженерно-геологические расчеты и моделирование. М.: Изд-во Московского ун-та, 2006. 246 с.
8. Лобковский Л.И., Гарагаи И.А. Математический анализ устойчивости Кавказского склона Черного моря и развитие оползневых процессов при землетрясениях // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002. С. 390–402.
9. Локтев А.С. Методические основы инженерно-геологических изысканий для нефтегазопромысловых сооружений на шельфе арктических морей: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 256 с.
10. Москаленко В.Н., Шимкус К.М. Оползневые образования и отложения турбидитовых потоков на Кавказском материковом склоне Черного моря // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 2005. Т. 80. Вып. 6. С. 33–38.
11. Сафьянов Г.А. Взаимодействия подводных каньонов и береговой зоны океана // Комплексные исследования природы океана. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 7. С. 23–27.
12. Сафьянов Г.А., Менишиков В.Л., Пеишков В.М. Подводные каньоны — их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. 197 с.
13. Сафьянов Г.А., Пыхов Н.В. Геоморфология, осадки и литодинамика конуса выноса ингульского подводного каньона (Черное море) // Литодинамика и гидродинамика контактной зоны океана. М.: Наука, 1981. С. 78–91.
14. СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах. М.: Госстрой России, 2000. 44 с.
15. СНиП 2.05.06-85\*. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой России, 1997.
16. Фоменко И.К., Захаров В.С., Самаркин-Джарский К.Г., Сироткина О.Н. Учет сейсмического воздействия при расчете устойчивости склонов (на примере Краснополянского геодинамического полигона) // Геориск. 2009. № 4. С. 50–55.
17. Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Современные тенденции в расчете устойчивости склонов // Инженерные изыскания в строительстве: материалы 7-й общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО «Геомаркетинг». 2011. С. 78–81.
18. Хуан Я.Х. Устойчивость земляных откосов. М.: Стройиздат, 1983.
19. Чугаев Р.Р. Расчет устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига грунта. М.-Л.: Энергия, 1964. 178 с.
20. Balassanian S., Ashirov T., Chelidze T. et al. Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // Annali Geofis. 1999. V. 42. P. 1139–1151.
21. BSI BS 1377-2. EN-Methods of test for soils for civil engineering purposes Part 2. Classification tests. London, UK: British Standards Institution, 1990.
22. Duncan J.M., Wright S.G. Soil strength and slope stability. New Jersey: Wiley, 2005.
23. EN 1998-1:2004 (E). Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. UK: British Standards Institution, 2004.
24. Morgenstern N.R., Price V.E. The analysis of the stability of general slip surfaces // Geotechnique. 1965. V. 15. P. 70–93.
25. prEN 1998-5:2003 (E). Eurocode 8/ Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. UK: British Standards Institution, 2003.
26. Stability modeling with SLOPE/W 2007 version. An engineering methodology. Fourth edition. Canada: GEO-SLOPE International Ltd., 2008. P. 355.



## ООО ПРИОБСКИЙ «НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗЫСКАНИЙ»



**Валентин Игнатьевич ШАБУНИН**  
Директор  
ООО Приобский «НМЦИСИЗ»

ООО Приобский «НМЦИСИЗ» обладает значительным многолетним опытом по выполнению инженерных изысканий, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства, включая особо опасные и технически сложные объекты капитального строительства. Благодаря высокой технической оснащенности, квалифицированным специалистам, аккредитованной лаборатории механики грунтов и сертифицированной системе менеджмента качества, ООО Приобский «НМЦИСИЗ» на протяжении 18 лет выполняет комплексные инженерные изыскания по обустройству и реконструкции нефтяных и газовых месторождений ТНК-ВР, ОАО «НК «Роснефть», ОАО «НГК «Славнефть», ООО «ЛУКОЙЛ Западная Сибирь», ОАО «Сургутнефтегаз», дочерних обществ ОАО «Газпром». Кроме того, ООО Приобский «НМЦИСИЗ» принимает активное участие в сфере гражданского строительства городов Нижневартовск, Мегион, Радужный, Лангепас, Стрежевой, Пыть-Ях, Ханты-Мансийск, Излучинск, Сургут, Когалым, Нягань, Уват и т.д.

**В состав работ, выполняемых ООО Приобский «НМЦИСИЗ», входят:**

- Инженерно-геодезические изыскания;
- Инженерно-геологические изыскания;
- Инженерно-гидрометеорологические изыскания;
- Инженерно-экологические изыскания;
- Инженерно-геотехнические изыскания;
- Обследование состояний грунтов оснований зданий и сооружений.



**628617, Россия, Тюменская область, ХМАО-Югра,  
г. Нижневартовск, ул. Чапаева, дом 57, офис 83.  
Тел./факс: +7 (3466) 296-791; тел.: +7 (3466) 296-792, 296-793.  
E-mail: [nmcisiz@mail.ru](mailto:nmcisiz@mail.ru)  
[www.nmcisiz.ru](http://www.nmcisiz.ru)**



# РАСЧЕТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ИХ ВОДОНАСЫЩЕНИЯ

## DESIGN RESISTANCE OF FOUNDATION SOILS DEPENDING ON THEIR WATER SATURATION DEGREE

**ТЕР-МАТИРОСЯН З.Г.**

Заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов (МГрОиФ) Московского государственного строительного университета (МГСУ), д.т.н., профессор,  
г. Москва, mgroif@mail.ru

**СИДОРОВ В.В.**

Старший преподаватель и аспирант кафедры МГрОиФ МГСУ, г. Москва, vitsid@mail.ru

**НГУЕН Х.Х.**

Аспирант кафедры МГрОиФ МГСУ, г. Москва, huyhiep\_1984@yahoo.com

**TER-MARTIROSIAN Z.G.**

The head of the department of soil mechanics and foundation engineering of Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE), doctor of technical sciences, professor,  
Moscow, mgroif@mail.ru

**SIDOROV V.V.**

A senior lecturer and postgraduate student of MSUCE, Moscow, vitsid@mail.ru

**NGUEN H.H.**

A postgraduate student of MSUCE, Moscow, huyhiep\_1984@yahoo.com

**Ключевые слова:**

расчетное сопротивление; степень водонасыщения; избыточное поровое давление; газосодержащая вода; критическая нагрузка; растворенный воздух; сжимаемость; поверхностное натяжение.

**Key words:**

design resistance; water saturation degree; excess pore pressure; gas-containing water; critical load; dissolved air; compressibility; surface tension.

**Аннотация**

В статье приводится аналитическое и численное решение задачи по определению расчетного сопротивления глинистых грунтов оснований с низким коэффициентом фильтрации в зависимости от степени их водонасыщения. Рассматриваются образование зон предельного равновесия под краями фундамента, осадка его основания и предельная нагрузка в зависимости от степени водонасыщения таких грунтов. Рекомендуется внести дополнения в нормативные документы по определению расчетного сопротивления водонасыщенных оснований указанного типа.

**Введение**

Известно, что расчеты оснований фундаментов по I и II группам предельных состояний [1, 2] базируются на определении расчетного и предельного сопротивлений слагающих их грунтов, в основе которого лежит решение задачи Пузыревского (рис. 2). Это решение позволяет определить начальное критическое (первую критическую нагрузку  $p^*$ ) и расчетное ( $R_p$ ) значения распределенной нагрузки по полосе шириной  $b = 2a$  на поверхности грунтового полупространства. При этом не учитывается влияние избыточного порового давления, которое неизбежно возникает в глинистых водонасыщенных грунтах на начальном этапе нагружения и не рассеивается длительное время из-за низкого коэффициента фильтрации.

В настоящей работе на основе рассмотрения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового полупространства под воздействием собственного веса и распределенной нагрузки  $p$  по полосе шириной  $b = 2a$  приводится аналитическое решение задачи Пузыревского с учетом избыточного порового давления в зависимости от степени водонасыщения грунтов основания.

Для достоверного определения порового давления необходимо в первую очередь установить коэффициенты сжимаемости газосодержащей поровой воды ( $K_{wg}$ ) и газовых пузырьков ( $K_g$ ), т.е. их жесткость, и сравнить их с коэффициентом сжимаемости скелета

**Abstract**

The article presents analytical and numerical solutions of the task on determination of the design resistance of clayey foundation soils with a low permeability coefficient depending on their water saturation degree. Formation of limit equilibrium zones under foundation edges, foundation bed settlements and critical loads depending on water saturation degree of the soils are considered. The authors recommend to introduce some additions on the design resistance determination for water-saturated foundation soils of the mentioned type into the normative documents.

$K_s$ . От соотношения  $K_{wg}/K_s$  и  $K_g/K_s$  существенно зависит избыточное поровое давление, т.к. оно определяется в зависимости от среднего напряжения  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$  (где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — главные нормальные напряжения), а коэффициент порового давления —  $\beta_0 = K_w / (K_w + nK_s)$  (где  $K_w$  — модуль объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды;  $n$  — пористость грунта), т.е.  $u_w = \sigma\beta_0$ .

## О сжимаемости поровой воды

Известно, что в глинистых грунтах всегда содержится воздух в растворенном виде и в виде мельчайших пузырьков в поровой воде. Наличие воздуха в поровой воде обуславливает ее сжимаемость, которая отражается на избыточном поровом давлении, возникающем под воздействием внешней нагрузки (рис. 1). С ростом степени водонасыщения растет и модуль объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды, следовательно, растет и поровое давление.

Далее будет приведено решение задачи по определению модуля объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды ( $K_w$ ) в зависимости от степени водонасыщения ( $S_r$ ), модуля объемной деформации воды, содержащей растворенный воздух ( $K_{wg}$ ), и модуля объемной сжимаемости пузырьков воздуха ( $K_g$ ).

Известно, что поровое пространство объемом  $V$  заполнено водой с растворенным в ней воздухом (объема  $V_{wg}$ ) и частично нерастворенными пузырьками газа (объема  $V_g$ ), причем:

$$V = V_{wg} + V_g. \quad (1)$$

Изменение объема пузырьков газа  $V_g$  при изменении давления в поровой воде от  $p_1$  до  $p_2$  можно определить на основе закона Бойля — Мариотта, согласно которому в изотермическом режиме справедливо соотношение  $p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}$ . Тогда получаем:

$$\Delta V_g = V_{g1} (1 - p_1 / p_2). \quad (2)$$

Уравнение (2) после преобразования можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V_g}{V_g} = \frac{1}{p_1 + \Delta p}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что

$$K_g = p_1 + \Delta p, \quad (4)$$

$$\text{откуда} \quad p_1 = p_a + \gamma_w z, \quad (5)$$

где  $p_a$  — атмосферное давление,  $z$  — глубина от уровня воды,  $\gamma_w$  — удельный вес воды.

Изменение объема поровой воды в целом ( $\Delta V_m$ ) можно определить как сумму изменений  $V_{wg}$  и  $V_g$ :

$$\Delta V_m = \Delta V_{wg} + \Delta V_g. \quad (6)$$

Разделяя обе части этого уравнения на  $V_w$  и учитывая, что  $V_g = V_w - V_{wg}$ , с учетом формулы (2) получаем

выражение для относительной объемной сжимаемости поровой воды в целом:

$$\frac{\Delta V_w}{V_w} = \frac{\Delta V_{wg}}{V_w} \cdot \frac{V_{wg}}{V_{wg}} + \frac{V_w - V_{wg}}{V_w} (1 - p_1 / p_2), \quad (7)$$

или

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{wg} S'_r = (1 - S'_r) (1 - p_1 / p_2), \quad (8)$$

где  $S'_r$  — степень водонасыщения грунта на начальном этапе, равная:

$$S'_r = V_{wg} / V_w. \quad (9)$$

Из уравнения (6) с учетом формулы (2) следует:

$$\frac{1}{K_w} = \frac{S_r}{K_{wg}} + \frac{(1 - S_r)}{p_1 + \Delta p}, \quad (10)$$

где  $\Delta p = p_2 - p_1$  — приращение давления в поровой воде.

После некоторых преобразований получаем модуль объемной сжимаемости газосодержащей поровой воды:

$$K_w = K_{wg} K_g / (K_{wg} (1 - S_r) + K_g S_r), \quad (11)$$

где модуль объемной деформации воды с растворенным в ней воздухом  $K_{wg} \approx K_w^0 = 2 \cdot 10^6$  кПа ( $K_w^0$  — модуль объемной сжимаемости дегазированной воды); модуль объемной сжимаемости пузырьков воздуха  $K_g = p_1 + \Delta p$ .

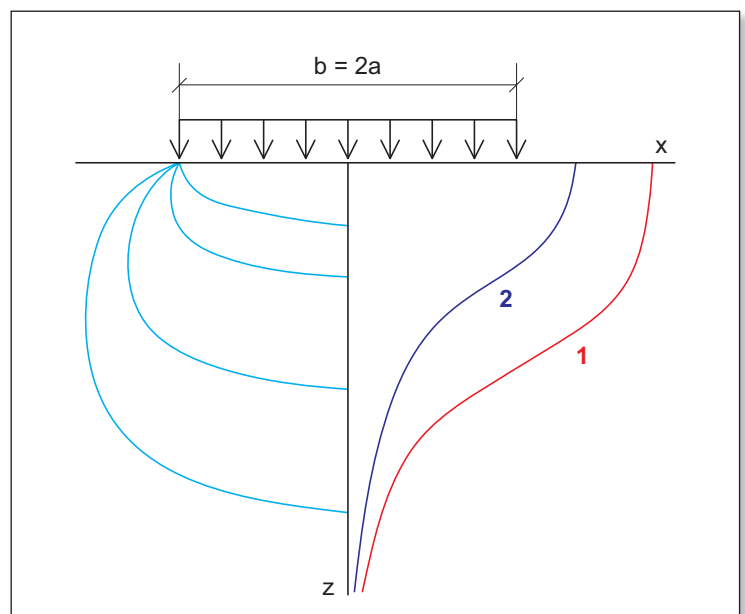
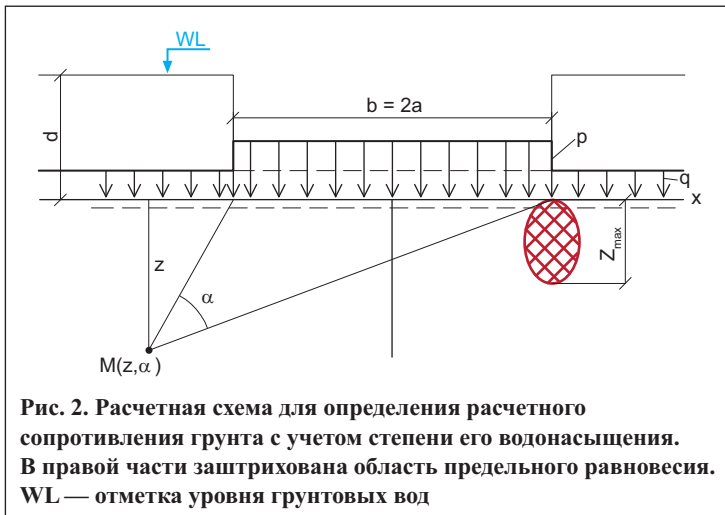


Рис. 1. Схематическое представление эпюр среднего значения суммы главных напряжений  $\sigma = \sigma_v / 3$  (где  $\sigma_v$  — сумма главных напряжений, т.е.  $\sigma_v = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ) (1), избыточного порового давления (2) и его изолиний (слева) в водонасыщенном основании при действии нагрузки  $p$  на полосу основания шириной  $b = 2a$  в момент ее приложения (плоская задача)



Отсюда следует, что при  $S_r \rightarrow 1$   $K_w \rightarrow K_{wg}$ , т.е. при полном водонасыщении, модуль объемной сжимаемости поровой воды равен модулю объемной сжимаемости воды, содержащей растворенный воздух. Отметим, что изменение степени водонасыщения при изменении давления в поровой воде или в пузырьках воздуха, если пренебречь поверхностным натяжением воды  $q$  в пузырьках:  $p_g = u_w + 2q/r$ , где  $r$  — радиус пузырьков в интервале от  $p'_g$  до  $p''_g$ , определяется известной [1] зависимостью следующего вида:

$$S''_r = \frac{p''_g / p'_g}{(1 - k_H)(p''_g / p'_g - 1) + (1 - S'_r) / S'_r}, \quad (12)$$

где  $S''_r$  — степень водонасыщения грунта на втором этапе;  $k_H$  — коэффициент растворимости воздуха в воде (коэффициент Генри), причем  $k_H = 0,0205$  при  $t = 20^\circ\text{C}$ .

Например, если  $S'_r = 0,9$  при  $p'_g = 0,1$  Па, то  $S''_r = 0,957$  при  $p''_g = 0,2$  Па,  $S''_r = 0,997$  при  $p''_g = 0,6$  Па.

### 0 коэффициенте порового давления

При всестороннем обжатии грунта с интенсивностью среднего тотального напряжения  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$  в условиях отсутствия дренажа в нем возникают избыточное давление в поровой воде  $u_w$  и напряжение в скелете  $\sigma_s$ , причем

$$\sigma = \sigma_s + u_w. \quad (13)$$

Соотношение  $\sigma_s$  и  $u_w$  зависит от соотношения жесткости скелета  $K_s$  и поровой воды  $K_w$ , а также от пористости грунта, т.к. объемные деформации скелета ( $\varepsilon_s$ ) и поровой воды ( $\varepsilon_w$ ) связаны известной зависимостью следующего вида:

$$\varepsilon_s = n\varepsilon_w. \quad (14)$$

Полагая, что

$$\varepsilon = \sigma / K; \varepsilon_s = \sigma_s / K_s; \varepsilon_w = u_w / K_w, \quad (15)$$

где, напомним,  $K_s$ ,  $K_w$ ,  $K$  — модули объемной деформации скелета, поровой воды и грунта в целом соот-

ветственно;  $K_w$  определяется по формуле (9) с учетом зависимостей (13) и (14), получим:

$$u_w = \sigma \beta_0, \quad (16)$$

$$\text{причем } K = K_s + K_w/n, \quad G_s = G, \quad (17)$$

где  $G$  — модуль сдвига грунта в целом;  $G_s$  — модуль сдвига скелета грунта;

$$\nu = \frac{K - 2G}{2(K + 2G)}; \nu_s = \frac{K_s - 2G}{2(K_s + G)}, \quad (18)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона грунта в целом;  $\nu_s$  — коэффициент Пуассона скелета грунта.

Отсюда следует, что  $u_w \rightarrow \sigma$ ,  $\nu \rightarrow 0,5$  при  $K_w \rightarrow \infty$  и что  $\nu > \nu_s$ , а также  $K > K_s$ .

При известном  $\sigma(x, y)$ , полученном на основе решения задачи об НДС грунтового основания (см. рис. 1), можно определить и избыточное поровое давление  $u_w(x, y)$  на основании формулы (16), т.е. в зависимости от степени водонасыщения грунта. Следовательно, можно дать количественную оценку НДС грунтового основания, в т.ч. определить осадку, начальную и критическую нагрузки и расчетное сопротивление грунтов основания.

### Расчетное сопротивление грунтов основания с учетом степени их водонасыщения

Известно, что под действием распределенной нагрузки интенсивностью  $p$  по полосе шириной  $b = 2a$  в грунтовом основании возникает избыточное НДС, которое описывается на основании решения задачи Фламана (рис. 2). Главные эффективные напряжения  $\sigma_1(x, z)$  и  $\sigma_3(x, z)$  при этом определяются формулой вида:

$$\sigma_{1,3} = (p - q/\pi)(\alpha \pm \sin \alpha) - u_w(\alpha), \quad (19)$$

где  $\alpha$  — угол видимости, определяющий местоположение точки  $M(\alpha, z)$ ;  $q$  — пригрузка на уровне  $z = 0$  от веса вышележащей толщи грунта мощностью  $d$  с удельным весом во взвешенном состоянии  $\gamma'$ , т.е.  $q = \gamma'd$ .

Распределение эффективных напряжений в грунтовом основании от действия пригрузки  $q$  в предположении гидростатического распределения можно определить с использованием следующей формулы:

$$\sigma_{zg} = \sigma_{xg} = \gamma'(d + z), \quad (20)$$

где  $\sigma_{zg}$  — вертикальное напряжение от веса грунта;  $\sigma_{xg}$  — горизонтальное напряжение от веса грунта по оси  $x$ .

Суммарные значения главных напряжений  $\sigma_v$  и избыточного порового давления  $u_w$  в грунтовом основании можно определить с учетом формул (19) и (16) следующим образом:

$$\sigma_v = \frac{2(p - q)}{\pi} \alpha (1 + \nu), \quad (21)$$



где

$$u_w(\alpha) = \frac{(p-q)}{3\pi} \cdot \beta_0 \cdot (1+\nu) \cdot \alpha, \quad (22)$$

где  $\pi$  — математическая константа (число «пи»), приблизительно равная 3,14.

Эффективные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  можем определить на основе уравнений (19), (20) и (22):

$$u_w(\alpha) = \frac{(p-q)}{3\pi} \cdot \beta_0 \cdot (1+\nu) \cdot \alpha, \quad (22)$$

Условие предельного равновесия в точке М ( $\alpha, z$ ) можем определить, если напряжения по формуле (23) подставить в известное уравнение предельного состояния следующего вида:

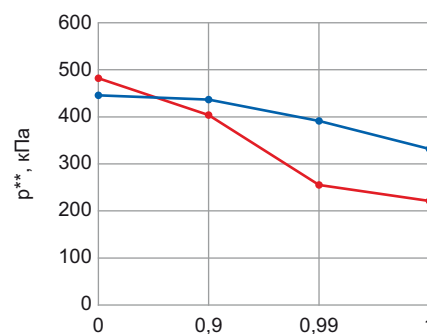
$$\sin \varphi = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 + \sigma'_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi), \quad (24)$$

где  $c$  — удельное сцепление,  $\varphi$  — угол внутреннего трения (параметры прочности грунта);  $\sigma'_1$  и  $\sigma'_3$  — эффективные напряжения,  $\sigma'_1 = \sigma_1 - u_w$ ,  $\sigma'_3 = \sigma_3 - u_w$ .

Тогда получим:

$$z = \frac{p-q}{\pi \gamma'} \left( \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} - B \alpha \right) - \frac{c}{\gamma'} \cdot \operatorname{ctg} \varphi - d, \quad (25)$$

где  $B = 1 - 2\beta_0 (1 + \nu) / 3$ .



|                     |        |        |        |        |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| — p**, МКЭ          | 481,8  | 403,8  | 255    | 221,4  |
| — p**, аналитически | 445,39 | 436,76 | 391,38 | 331,78 |

Рис. 3. Кривые зависимости  $p^{**}$  от  $S_r$ , рассчитанные по формуле (26) (аналитически) и в программе PLAXIS (методом конечных элементов — МКЭ). Непосредственно под горизонтальной осью указаны значения  $S_r$ , которым соответствуют точки на графиках. Под ними приведены соответствующие величины  $p^{**}$ , полученные численным и аналитическим методами.

# ГЕОТЕХНИКА

Международный журнал для изыскателей,  
проектировщиков и строителей

Цель журнала —  
знакомство российских специалистов  
с передовым отечественным  
и зарубежным опытом  
в области геотехники

Периодичность в 2012 году:

**6 номеров**

Стоимость годовой подписки:

**3900 рублей**

[info@geomark.ru](mailto:info@geomark.ru)



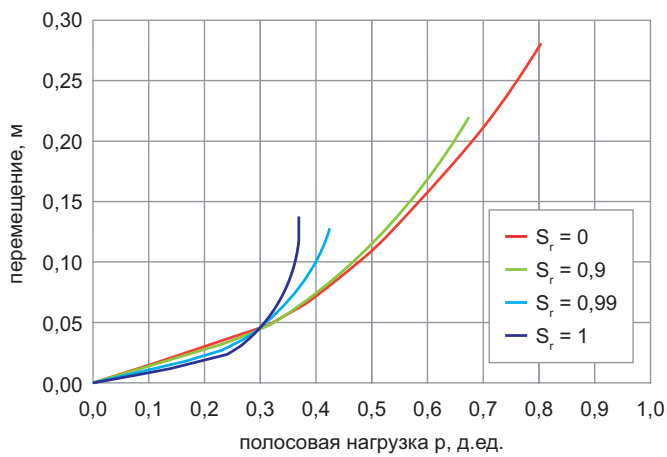


Рис. 4. Графики вертикальных перемещений основания  $S$  (м) в зависимости от полосовой нагрузки  $p$  (д.ед., причем полная приложенная нагрузка равна единице) при разной степени водонасыщения  $S_r$  слагающего его грунта

Уравнение (25) описывает границу (глубину  $z^*$ ) области предельного равновесия в зависимости от  $\alpha$ , то есть  $z^* = f(z, \alpha)$ . Максимальную глубину этой области  $z_{\max}^*$  (см. рис. 2) можно определить из условия  $dz^*/d\alpha = 0$ . Тогда получаем  $\alpha^* = \arccos(B \cdot \sin \varphi)$ , или  $\cos \alpha = B \cdot \sin \varphi$ , (где  $\alpha^*$  — угол видимости при  $z = z_{\max}$ ). Подставив это выражение для  $\alpha^*$  в уравнение (25), после некоторых преобразований получим следующую формулу для критической распределенной нагрузки  $p^*$  в зависимости от  $z_{\max}^*$  и степени водонасыщения  $S_r$ , т.к.  $\beta_0 = f(S_r)$  (см. формулы (9) и (16)):

$$p^* = \frac{\pi(\gamma' z_{\max}^* + \gamma' d + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)}{\sin \alpha^* / \sin \varphi - B \alpha^*} + \gamma' d. \quad (26)$$

Это выражение в частном случае, когда поровое давление мало ( $S_r < 0,8$ ) и  $\beta_0 \approx 0$ ;  $\beta \approx 1$  совпадает с известным решением задачи Пузыревского:

$$p^* = \frac{\pi(\gamma' z_{\max}^* + \gamma' d + c \cdot \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi - \pi/2 + \varphi} + \gamma' d. \quad (27)$$

Начальные критические нагрузки, определенные по формулам (26) и (27), существенно различаются. Так, при одинаковых  $\gamma' = 20$  кН/м<sup>3</sup>,  $b = 2$  м,  $c = 0,1$  МПа,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $p^* = 5,64$  МПа по (26) и  $p^* = 10,2$  МПа по (27). Очевидно, что при одинаковых значениях приложенной нагрузки  $p$  в водонасыщенном основании величина  $z_{\max}$  будет больше, чем в неводонасыщенном. Для снижения этого негативного явления следует под фундаментом устроить песчано-гравелистую дренажную подушку и снизить темп работ в начале строительства.

На рисунке 3 представлены графики зависимости  $p^{**}$  от  $S_r$  (при значениях  $S_r$ , равных 0,00; 0,90; 0,99; 1,00), рассчитанные по формуле (26) и с помощью программного комплекса PLAXIS при заданных значениях  $\gamma'$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $d$  и  $z_{\max} = b/4$  (задано в соответствии с PLAXIS). Из рисунка видно, что эти зависимости являются нелинейными и имеют максимальные значения при  $\beta_0 = 1$ , т.е. при полном водонасыщении.

Отметим, что степень водонасыщения влияет также на зависимость осадки  $S$  от нагрузки  $p$ . Такую зависи-

мость можно получить, используя известное решение Шлейхера в интерпретации Н.А. Цытовича:

$$S = \omega \cdot p_0 \cdot b \cdot (1 - \nu) / 2G, \quad (28)$$

где  $\omega$  — коэффициент, зависящий от формы в плане и жесткости фундамента;  $p_0 = p - \gamma \cdot d$  (где  $p_0$  — дополнительное давление, и  $\gamma$ ,  $d$  — такие же, как в формуле (27));  $G = G_s$ ;  $\nu > \nu_s$ .

Отсюда следует, что осадки водонасыщенного основания больше, чем неводонасыщенного, т.к.  $\nu > \nu_s$ . При  $\nu = 0,5$  и  $\nu_s = 0,3$  осадка первого в 1,4 раза больше, чем второго. Аналогичный результат получается при численном решении задачи с помощью программы PLAXIS (рис. 4). Особенно сильно различаются предельные значения напряжений  $p$ , т.е. величины второй критической нагрузки  $p^{**}$  (см. рис. 5). Учитывая, что расчетное сопротивление находится между  $p^*$  и  $p^{**}$ , следует предположить, что оно меньше в водонасыщенных грунтах, чем в неводонасыщенных.

## Выводы и рекомендации

1. Анализ результатов расчета сопротивления грунтов оснований  $R_p$  в зависимости от степени их водонасыщения  $S_r$ , полученных аналитическим и численным методами, показал, что влияние  $S_r$  на  $R_p$  существенное и значения  $R_p$ , например при  $S_r = 1,0$  и  $S_r = 0,8$ , могут различаться между собой в несколько раз.

2. Для снижения этого негативного явления следует устраивать под фундаментом песчано-гравийную дренажную подушку и регулировать темпы его нагружения путем контроля степени уплотнения глинистых грунтов в контактной зоне под ней.

3. Сравнение результатов аналитического и численного решений поставленной задачи по определению  $R_p$  в зависимости от  $S_r$  показало, что они сходятся. Следовательно, предложенное аналитическое решение может быть рекомендовано для использования в инженерной практике.

4. Осадка основания, обусловленная сдвиговыми деформациями скелета водонасыщенного грунта, больше, чем для неводонасыщенного. Это обусловлено различием между значениями коэффициента Пуассона грунта в этих двух состояниях ( $\nu > \nu_s$ ).

5. Результаты, изложенные в статье, рекомендуются учитывать при разработке последующих редакций нормативного документа [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 550 с.
2. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2011.
3. Plaxis версия 8: справочное руководство / пер. В.И. Астафьева. М.: Факт, 2006. 182 с. URL: <http://www.diska.net/soft/291-plaxis-versija-8.html>.
4. PLAXIS 2D Version 8. Reference Manual. *plaxis-manual-2d-version8*.

# Проектно-изыскательская и строительная компания «Геострой-Ф»



ООО «Геострой-Ф» использует самые современные и достоверные из всех имеющихся способы получения инженерно-геологической информации, что гарантирует высокую степень точности данных для проектирования, включая проведение всех видов опытных работ.

Компания выполняет:

- комплексное проектирование жилых и общественных зданий;
- инженерно-геодезические и инженерно-геологические изыскания в сложных и особо сложных грунтовых условиях;
- проектирование усиления грунтов основания фундаментов деформирующихся и вновь строящихся зданий;
- проекты усиления строительных конструкций;
- проекты шпунтовых рядов и подпорных стен, плитных и свайных фундаментов;
- техническое обследование грунтов, фундаментов и надземных конструкций существующих зданий для их реконструкции, капитального ремонта или надстройки.

На сегодняшний день предприятие оснащено современным буровым и передовым лабораторным оборудованием для выполнения изысканий.

Компания способна выполнить для заказчика весь комплекс работ, связанный с инвестированием в строительство — начиная с изысканий и заканчивая проектом во всех его аспектах и получением разрешения на строительство.



**Юридический адрес:** 344064 Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Днепроградская, д. 54

**Тел.:** +7 (863) 201-56-38

**Факс:** +7 (863) 201-56-39

**E-mail:** [geostroy@aaanet.ru](mailto:geostroy@aaanet.ru)

**www.geostroy-plus.ru**

**www.geostroy.irnd.ru**



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ С ГРУНТАМИ ОСНОВАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMAL INTERACTION BETWEEN CULVERTS AND THEIR GROUND BASES IN THE PERMAFROST ZONE

**АЛЕКСЕЕНКО Е.С.**

Аспирант кафедры организации, технологии и управления строительством Института пути, строительства и сооружений Московского государственного университета путей сообщения, г. Москва, [evalekseenko@gmail.com](mailto:evalekseenko@gmail.com)

**ALEKSEENKO E.S.**

A post-graduate student of the organization, technology and management of construction department of the Institute of Railway, Construction and Constructions of Moscow State University of Railway Transport, Moscow, [evalekseenko@gmail.com](mailto:evalekseenko@gmail.com)

### Ключевые слова:

водопротупная труба; математическое моделирование; многолетнемерзлые грунты; теплоизоляционный слой; железнодорожная насыпь.

### Key words:

culvert; mathematical simulation; permafrost soils; frost protection layer; railway embankment.

### Аннотация

Статья посвящена математическому моделированию температурного режима грунтов на участке расположения водопротупной трубы в пределах железнодорожной линии Бованенково — Карская в целях составления прогноза отепляющего влияния насыпи и предупреждения возможности развития опасных геокриологических процессов. В работе предложена схематизация задачи. Рассмотрены три возможных случая, характеризующих формирование наихудших и наилучших условий с точки зрения теплового и механического взаимодействия водопротупной трубы с многолетнемерзлыми грунтами. Результаты моделирования показали, что для уменьшения теплового влияния трубы под ней целесообразно укладывать теплоизоляционный слой пеноплекса толщиной 10 см.

### Abstract

The article is devoted to mathematical simulation of the soil temperature regime at a culvert site of the Bovanenkovo — Karskaya railway line to prognose the embankment thermal influence and prevent development of hazardous geocryological processes. The author proposes a schematization of the task and considers three possible cases characterizing formation of the worst and the best conditions from the standpoint of thermal and mechanical interaction between the culvert and permafrost soils. The simulation results have shown that it is advisable to put a 10 cm thick frost protection layer of PENOPLEX under the culvert to reduce its thermal influence.

Эксплуатация железных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов сопряжена со значительными постоянно возрастающими и часто непроизводительными материальными и трудовыми затратами на текущее содержание и ремонт. В основном эти затраты связаны с ликвидацией остаточных деформаций земляного полотна и искусственных сооружений вследствие осадок при оттаивании льдистых грунтов или пучения при промерзании влажных дисперсных грунтов основания. Дегградация многолетней мерзлоты вызывает развитие неравномерных осадок и термокарста, что угрожает безопасности движения поездов [4].

В связи с этим возникает необходимость сохранения грунтов основания земляного полотна в мерзлом состоянии на всем протяжении жизненного цикла железной дороги или, если процесс дегградации мерзлоты под земляным полотном уже происходит, прекращения этого процесса. Это требует охлаждения грунтов основания земляного полотна с помощью естественного или искусственного холода. Для снижения отепляющего действия застойных поверхностных вод применяют водопротупные трубы, размещаемые в нижней части насыпи [1].

Принятие эффективных решений при проектировании водопротупных труб требует умения определять температурные поля в окружающем грунте [1].

Для составления прогноза динамики слоя сезонного промерзания (оттаивания) грунта под насыпью железной дороги в месте расположения водопротупной трубы (со слоем щебня или теплоизоля-

Таблица 1

| Теплофизические свойства грунтов и теплоизолирующего материала (пеноплекса) |                                          |                                     |                            |                                   |                                         |                      |                                     |                |                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------|
| № слоя                                                                      | Интервал глубин от поверхности насыпи, м | Грунт или теплоизолирующий материал | Засоленность $D_{sal}$ , % | Температура начала замерзания, °C | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C) |                      | Объемная теплоемкость, Вт·ч/(м³·°C) |                | Затраты тепла на фазовые переходы $Q_{\Phi}$ , Вт·ч/м |
|                                                                             |                                          |                                     |                            |                                   | грунта или материала                    |                      |                                     |                |                                                       |
|                                                                             |                                          |                                     |                            |                                   | талого $\lambda_m$                      | мерзлого $\lambda_m$ | талого $C_m$                        | мерзлого $C_m$ |                                                       |
| 1                                                                           | 0,0–0,5                                  | Песок                               | 0,000                      | 0,0                               | 1,91                                    | 2,14                 | 800                                 | 560            | 36 118                                                |
| 2                                                                           | 0,5–0,6                                  | Пеноплекс                           | 0,000                      | 0,0                               | 0,03                                    | 0,03                 | 128                                 | 128            | 111                                                   |
| 3                                                                           | 0,6–3,0                                  | Песок                               | 0,000                      | 0,0                               | 1,91                                    | 2,14                 | 800                                 | 560            | 36 118                                                |
| 4                                                                           | 3,0–6,3                                  | Суглинок                            | 0,310                      | -1,1                              | 1,57                                    | 1,80                 | 740                                 | 505            | 40 173                                                |
| 5                                                                           | 6,3–49,8                                 | Песок                               | 0,025                      | 0,0                               | 1,40                                    | 2,00                 | 800                                 | 560            | 36 118                                                |

ционного слоя под ней) вследствие ее утепляющего влияния и предупреждения возникновения опасных геокриологических процессов в теле насыпи и непосредственно прилегающих к ней областях было выполнено математическое моделирование температурного режима грунтов с использованием программы WARM [3].

Прогноз динамики температурного поля грунтов на участках заложения водопропускных труб представляет собой сложную трехмерную задачу теплопроводности, которая может быть решена только численными методами. К сожалению, в настоящее время в нашем распоряжении нет программ численного решения трехмерных задач теплопроводности, поэтому пришлось пойти на упрощения и решать ее не в трехмерной, а в двухмерной постановке (в этом случае краевые эффекты не будут учитываться).

Водопропускная труба рассматривается как бесконечная в линейном направлении. Сложности возникают при назначении граничных условий на ее поверхности. В летние месяцы температура поверхности трубы может быть принята равной среднемесячной температуре воздуха, но в зимние месяцы труба постепенно (полностью или частично) заносится снегом. В последнем случае по трубе будет циркулировать холодный воздух.

Необходимо учитывать сложную динамику накопления снега на откосах насыпи, которая влияет на температурный режим трубы и, следовательно, на температурное состояние окружающего ее грунта.

Учитывая сложность и неоднозначность условий на разных участках трассы Обская — Бованенково и отсутствие данных о динамике снегонакопления, предлагаются три варианта типизации условий:

1) труба в течение зимнего периода не заносится снегом; среднемесячная температура ее поверхности в течение года принимается равной среднемесячной температуре воздуха; в летний период вокруг трубы формируется ореол сезонного оттаивания грунта, а зимой оттаявший грунт промерзает;

2) в летний период труба остается открытой и температура в ней равна температуре воздуха; зимой она полностью заносится снегом и ее температура равна среднемесячной температуре грунта насыпи на уровне середины трубы;

3) температура поверхности трубы в течение года равна среднемесячной температуре грунта насыпи на уровне середины трубы.

Очевидно, что в реальных условиях ни один из этих вариантов не реализуется, но они характеризуют крайние случаи формирования наихудших и наилучших условий теплового и механического взаимодействия водопропускной трубы с многолетнемерзлыми грунтами.

Рассмотрим пример формирования температурного режима грунтов на участке трассы ПК 14673. Для реализации второго и третьего типовых вариантов необходимо иметь данные о среднемесячной температуре грунта насыпи на глубине расположения середины трубы. Для этого была решена задача по расчету температурного режима тела насыпи.

Конструкция насыпи железной дороги согласно проекту включает сверху вниз: земляное полотно с крутизной откосов 1:4; полубойму из геотекстиля мощностью 0,4–0,5 м; теплоизоляционный слой в верхней части насыпи и защитный слой мощностью 0,4–0,5 м. Высота насыпи принята равной 3,0 м. Защитный слой представляет собой грунтовую массу с 70% скального грунта крупностью не более 0,15 м и 30% местного пылеватого песка. В качестве теплоизолятора используется пеноплекс толщиной 0,1 м. Полубоймы и земляное полотно отсыпаются из местных грунтов (рис. 1).

Под насыпью залегают многолетнемерзлые грунты ненарушенного сложения со среднегодовой температурой минус 4 °C. Данные по составу и физическим свойствам грунтов, необходимые для расчета, были взяты из материалов инженерно-геологических изысканий, проведенных на исследуемом участке ООО «Инжиниринговый центр Ямал» в 2009 году, по теплофизическим свойствам (табл. 1) — из СНиП 2.02.04-88 [2].

Зная температурный режим тела насыпи, среднемесячную температуру воздуха и характер снегонакопления (которые были взяты из материалов изысканий ООО «Инжиниринговый центр Ямал» и ОАО «ПНИИИС»), можно решать задачу о динамике температурного поля грунтов на участках заложения водопропускных труб. Для поверхности трубы задавались граничные условия первого рода — значения температуры, равные средне-

Таблица 2

| Среднемесячные значения температуры поверхности трубы, принятые при расчетах |                                     |       |       |       |       |      |      |      |      |     |      |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----|------|-------|-------|
| № вари-анта                                                                  | Температура $T$ принята равной      | Месяц |       |       |       |      |      |      |      |     |      |       |       |
|                                                                              |                                     | I     | II    | III   | IV    | V    | VI   | VII  | VIII | IX  | X    | XI    | XII   |
| 1                                                                            | $T$ воздуха                         | -20,0 | -21,9 | -18,9 | -12,9 | -5,5 | 2,0  | 7,3  | 6,9  | 3,5 | -4,0 | -12,6 | -17,8 |
| 2                                                                            | Летом $T$ воздуха, зимой $T$ насыпи | -2,4  | -3,0  | -5,6  | -6,5  | -6,2 | 2,0  | 7,3  | 6,9  | 3,5 | 0,1  | -0,2  | -0,4  |
| 3                                                                            | $T$ насыпи                          | -2,4  | -3,0  | -5,6  | -6,5  | -6,2 | -4,7 | -1,8 | -0,1 | 0,6 | 0,1  | -0,2  | -0,4  |

месячной температуре воздуха или грунта на глубине ее заложения.

По результатам математического моделирования были получены величины среднемесячной температуры грунта насыпи на глубине расположения центра водопропускной трубы на 10-й год эксплуатации. Значения температуры поверхности трубы для трех вариантов типизации условий, указанных выше, приведены в табл. 2.

Были рассмотрены два варианта конструктивного решения трубы:

1) для уменьшения теплового влияния трубы под ее нижней образующей укладывается слой пеноплекса толщиной 10 см (его теплофизические свойства приведены в табл. 1);

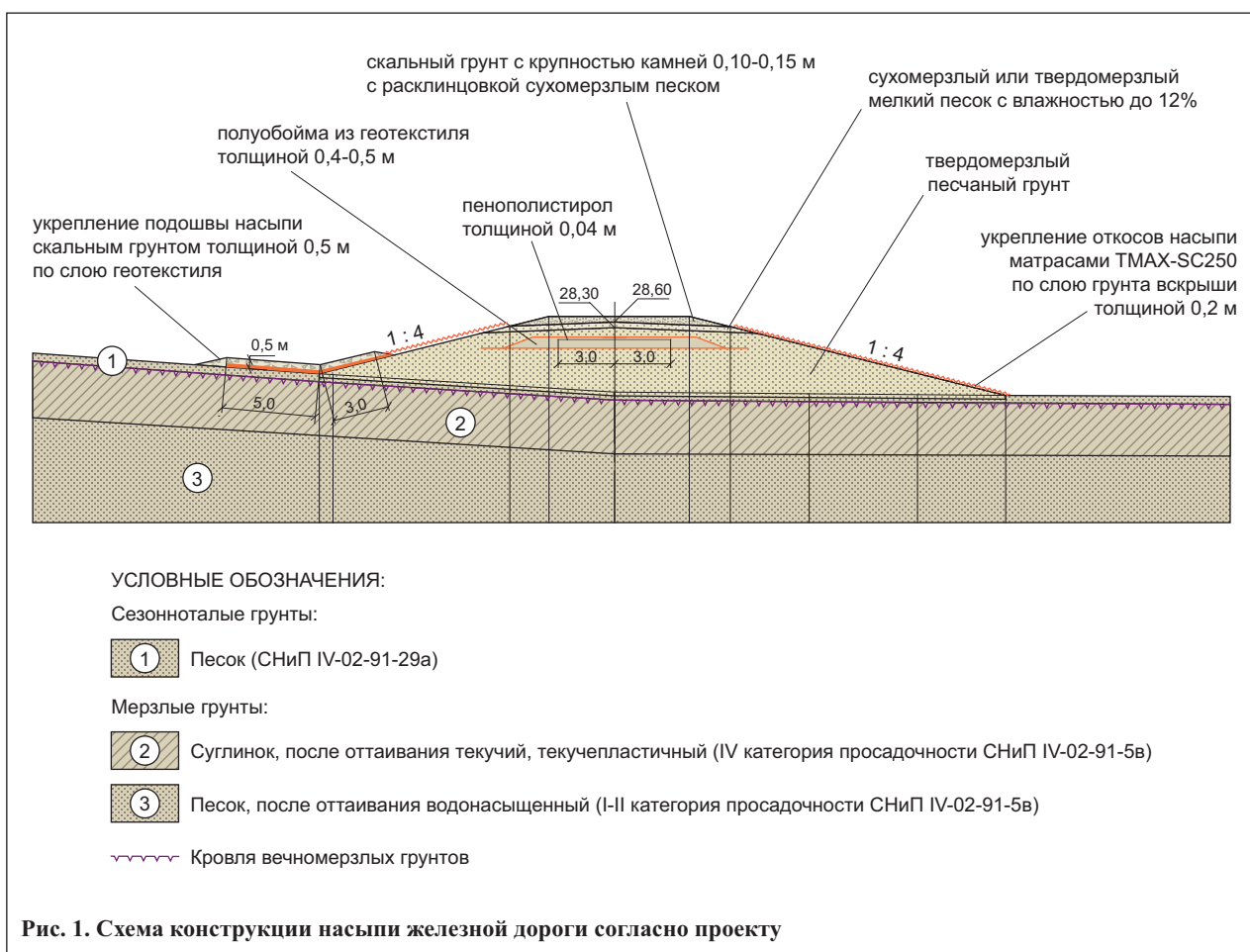
2) под нижней образующей трубы укладывается слой щебнистого грунта толщиной 10 см (коэффициент теплопроводности щебня в талом состоянии составляет 2,5 Вт/(м·°C), в мерзлом — 2,73 Вт/(м·°C);

его объемная теплопроводность в талом состоянии равна  $870 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ , в мерзлом —  $650 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ; затраты тепла на фазовые переходы составляют  $7000 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ ).

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 2, 3.

Проведенные расчеты позволяют выявить некоторые закономерности. В частности, в случае, когда под трубой уложен слой теплоизоляции (см. рис. 2), в течение всего года при всех рассмотренных вариантах температурного режима в трубе оттаивания грунта под ее нижней образующей не происходит.

При циркуляции в трубе атмосферного воздуха круглогодично или только в теплый период (см. варианты 1 и 2 на рис. 2) оттаивание грунта насыпи начинается в июне и достигает максимума в боковом направлении в конце сентября (0,8–1,0 м от края трубы). Грунт насыпи полностью промерзает в начале — конце декабря и с этого момента до конца мая находится



в мерзлом состоянии. В том случае, когда температурный режим в трубе определяется только тепловым состоянием насыпи (см. вариант 3 на рис. 2), оттаивание грунта происходит только в сентябре–октябре и не превышает 0,1 м от поверхности трубы в боковом направлении.

В случае, когда под трубой теплоизоляция отсутствует, а ее заменяет слой щебнистого грунта (см. рис. 3), в первых двух вариантах (воздух в трубе циркулирует либо круглогодично, либо только в теплый период) оттаи-

вание грунта также начинается в июне и заканчивается в первом случае в конце ноября, во втором — в январе. В этих вариантах, когда по трубе циркулирует воздух, сезонное оттаивание грунта в сентябре составляет около 0,7 м вертикально вниз от нижней образующей трубы. В боковом направлении величина оттаивания грунта аналогична. Если температурный режим в трубе соответствует среднемесячной температуре грунта насыпи, максимальное оттаивание не превышает 0,2 м от нижней образующей.

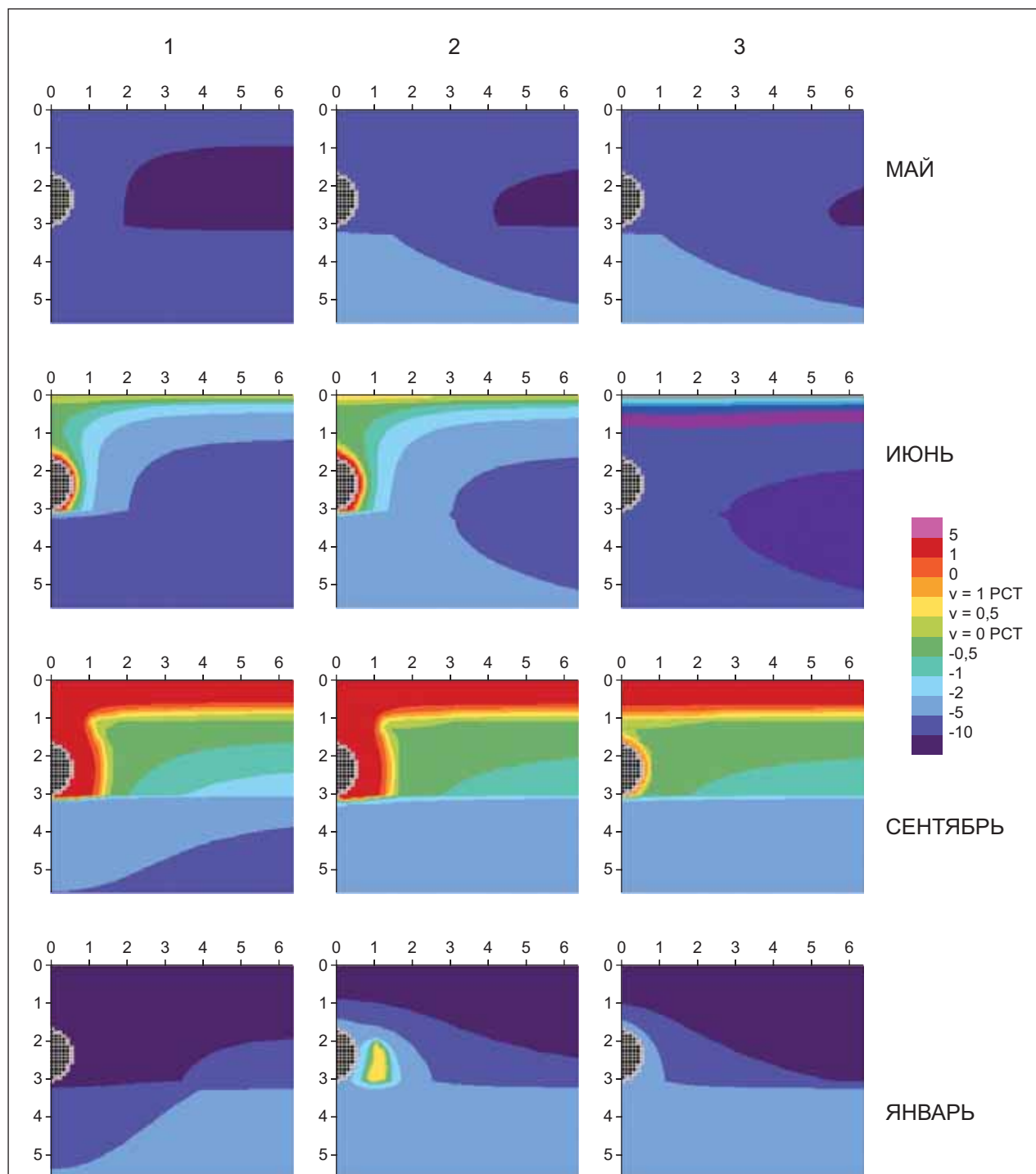


Рис. 2. Температурное поле грунтов на участке расположения водопропускной трубы ПК 14673 на 10-й год эксплуатации, под нижней образующей которой уложен слой пеноплекса: 1 — температура  $T$  на поверхности трубы равна среднемесячной  $T$  воздуха; 2 —  $T$  на поверхности трубы в летний период равна среднемесячной  $T$  воздуха, в зимний — среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы; 3 —  $T$  на поверхности трубы в течение всего года равна среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы

Сравнивая толщину слоев оттаявшего грунта при укладке слоя щебня или пеноплекса под водопропускной трубой по всем вариантам, можно сделать некоторые выводы. Толщина оттаявшего слоя под трубой, под которую уложен слой щебня, значительно превышает таковую в случае укладки пеноплекса. Для первого варианта условий разница составляет около 60 см (рис. 4, а), для второго — 70 см (рис. 5, а), для третьего — 20 см (рис. 6, а).

Мощность талого слоя в стороне от трубы при укладке слоя щебня или пеноплекса различается незначительно (около 10 см). Для первых двух вариантов грунт оттаивает больше, если уложен теплоизолятор (рис. 4, б, 5, б), для третьего — если уложен слой щебня (рис. 6, б).

По результатам моделирования динамики температурного поля грунтов на участках расположения водопропускных труб можно заключить, что для уменьше-

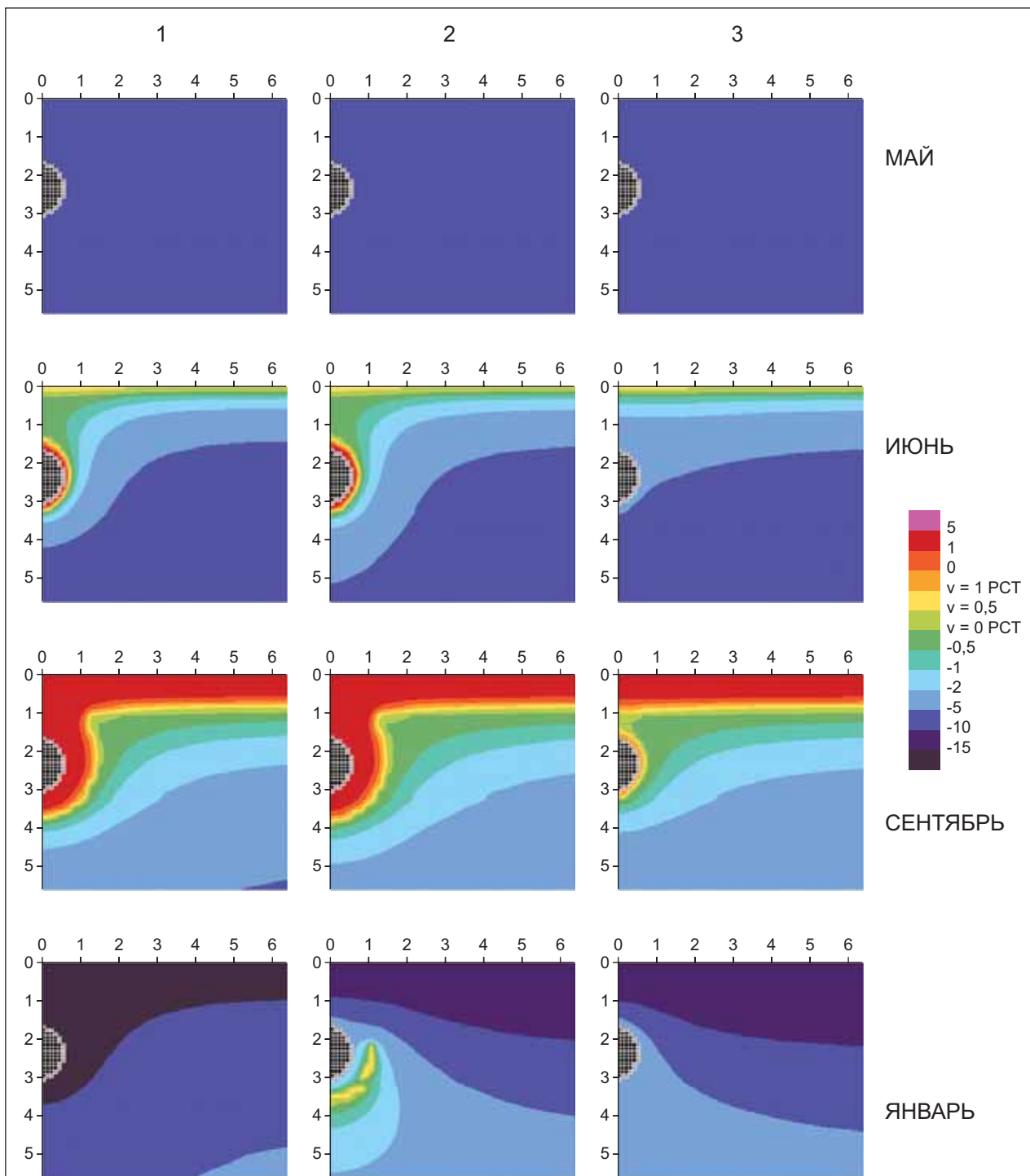
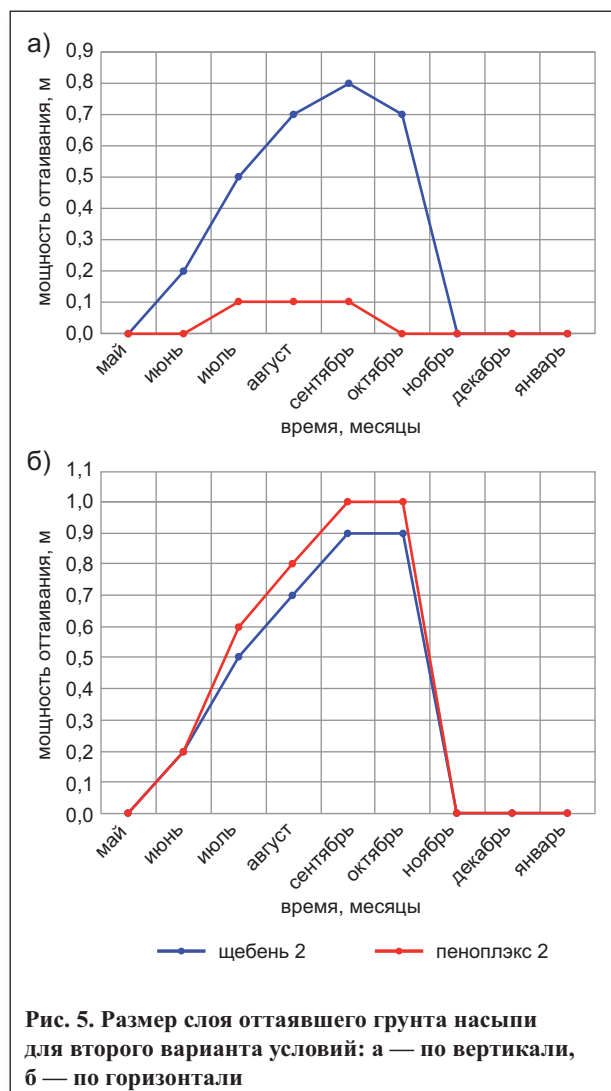
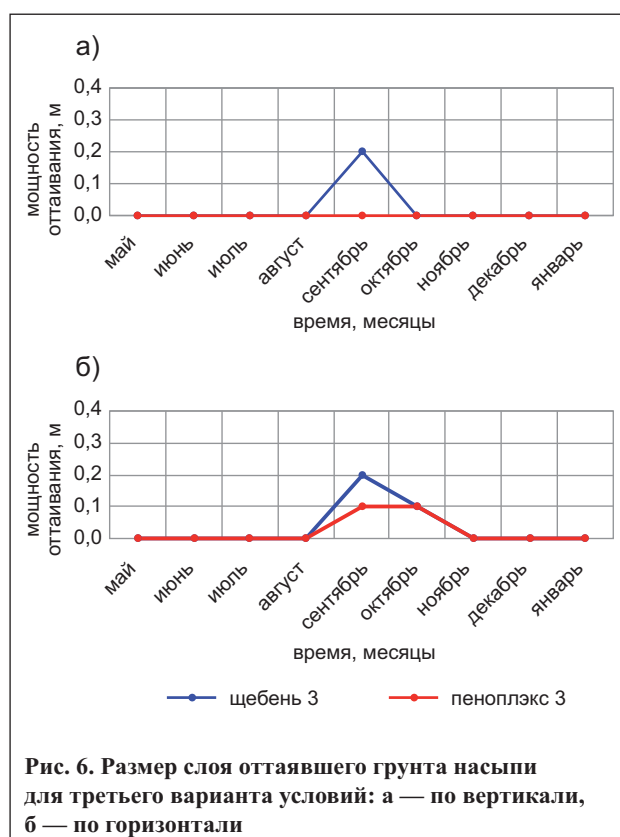
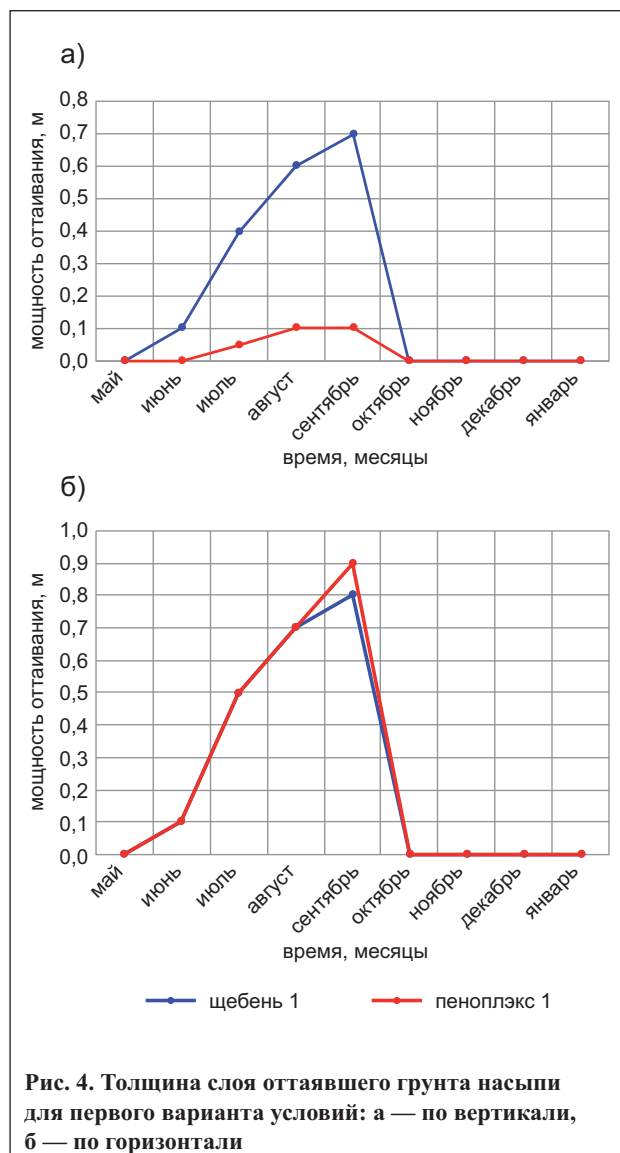


Рис. 3. Температурное поле грунтов на участке расположения водопропускной трубы ПК 14673 на 10-й год эксплуатации, под нижней образующей которой уложен слой щебнистого грунта: 1 — температура  $T$  на поверхности трубы равна среднемесячной  $T$  воздуха; 2 —  $T$  на поверхности трубы в летний период равна среднемесячной  $T$  воздуха, в зимний период — среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы; 3 —  $T$  на поверхности трубы в течение всего года равна среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы



ния теплового влияния трубы по вертикали под ее нижней образующей целесообразно укладывать слой пеноплэкса толщиной 10 см. Тепловое влияние трубы в горизонтальном направлении при укладке слоя щебня или пеноплэкса различается незначительно.

Полученные результаты, несмотря на ряд допущений и упрощений, принятых при построении расчетной модели, позволяют обоснованно перейти к выбору рациональных конструктивных решений системы «водопротекная труба — земляное полотно» при строительстве железных дорог в сложных геокриологических условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев В.Г. Геокриологические проблемы железных и автомобильных дорог в криолитозоне // Материалы Четвертой конференции геокриологов России. Т. 3. М.: Университетская книга, 2011. С. 48–54.
2. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Госстрой СССР, 1990.
3. Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM / Свидетельство № 940281. СПб.: РосАПО, 1994.
4. Ma W., Cheng G., Wu Q. Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai — Tibet railroad // Cold Regions Science and Technology. 2009. № 59. P. 3–11.

# ВЛИЯНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗВЕСТНЯКОВ НА ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

## INFLUENCE OF CONSTRUCTION LIMESTONE MINING ON THE ENVIRONMENTAL-GEOLOGICAL CONDITIONS OF ADJACENT AREAS

**КОРОЛЕВ В.А.**

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, korolev@geol.msu.ru

**МЕДВЕДЕВА С.Г.**

Геолог ООО «НПП «Центр-недра», г. Калуга, twelanis@mail.ru

**KOROLEV V.A.**

A professor of the department of engineering and ecological geology of the geological faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, korolev@geol.msu.ru

**MEDVEDEVA S.G.**

A geologist of the «Center-Nedra» Ltd, Kaluga, twelanis@mail.ru

### Ключевые слова:

месторождения строительных известняков; эколого-геологические условия; карьеры; разработка; мониторинг; химическое загрязнение; почвы; грунты; тяжелые металлы; полиароматические углеводороды.

### Key words:

construction limestone deposits; environmental-geological conditions; quarries; mining; monitoring, chemical pollution; soils; subsoils; heavy metals; polyaromatic hydrocarbons.

### Аннотация

В результате инженерно-экологических исследований изучено влияние разработки месторождений строительных известняков в Калужской области на эколого-геологические условия прилегающих территорий. Установлено, что при разработке происходит существенное нарушение эколого-геологических условий и техногенное химическое загрязнение окружающей среды, включая приземный слой воздуха, растительность, почвы, подпочвенные грунты и водные объекты. Предложены рекомендации по устранению негативных явлений и улучшению экологической обстановки.

*Проблемы зарождаются медленно, но размножаются быстро.*

Владислав Гжегорчик

### Введение

Проблема взаимодействия природной среды и техногенеза чрезвычайно сложна и носит глобальный характер. Еще в начале 90-х гг. прошлого века отмечалось, что всего за два десятилетия видовое разнообразие растительного и животного мира на Земле сократилось примерно на 1/5 часть, что уже было сопоставимо с этапами массовых вымираний биоты в геологическом прошлом [9]. Таким образом, последствия человеческой деятельности уже 20 лет назад соответствовали схеме развития экологических кризисов, с которыми связывают упрощение структуры экосистем, сокращение видового разнообразия, общее уменьшение приспособляемости видов. За прошедшее время интенсивность вторжения человечества в литосферу и активность его воздействия на экосистемы возросли.

Проблемы воздействия горнодобывающих предприятий, в т.ч. месторождений строительных материалов (МСМ), на состояние экосистем занимают не последнее место в реестре разнообразных воздействий человеческого сообщества на собственную среду обитания [6]. При этом для экосистем нарушаемых площадей совершенно безразлично, какого типа полезное ископаемое извлекается открытым способом, — и при заложении глубоких угольных разрезов, и при добыче строительных материалов, затрагивающей лишь приповерхностные отложения, почвенный слой подлежит сведению на всей площади отторжения. Причем в последнем случае воздействие на экосистемы значительно сильнее, чем в первом, поскольку глубокие разрезы предполагают обычно более длительное функционирование, чем при разработ-

### Abstract

The influence of construction limestone mining on the environmental-geological conditions of adjacent areas in the Kaluga Region is investigated on the basis of engineering-environmental survey results. It is found that essential disturbance of ecological-geological conditions and man-made chemical pollution of the environment (including the ground air layer, vegetation, soils, subsoils and water bodies) occur due to the mining. The authors propose some recommendations on elimination of the negative effects and improving of the environmental situation.



ке мелких месторождений с запасами до 2 млн м<sup>3</sup>, которые быстро заканчиваются при интенсивной отработке.

Среди месторождений строительных материалов Калужской области значительное место занимают месторождения известняков (рис. 1). Причем основная их часть сосредоточена в пределах Дзержинского района (Пятавский, Полотняно-Заводский карьеры и др.). Интенсивное развитие горнодобывающей промышленности в Дзержинском районе оказывает существенное влияние на окружающую среду. Происходят активное нарушение и перепланировка территорий, ослабление устойчивости геологической среды к техногенному воздействию, развиваются необратимые процессы ее изменения. Наблюдается загрязнение атмосферного воздуха, почвы, растительности, водных объектов продуктами разрушения пород, отвалами, выбросами пыли при проведении буровзрывных работ, нефтепродуктами, канцерогенными и мутагенными веществами от работы многочисленных автомобилей, экскаваторов, бульдозеров и другой техники. Негативное воздействие разработки МСМ накладывается на прочую техногенную нагрузку в Калужской области, которая является одной из наиболее активно развивающихся в промышленном отношении территорий в России.

Таким образом, в настоящее время назрела активная необходимость в оценке и определении количественных характеристик воздействия разработки МСМ (в т.ч. месторождений строительных известняков) на эколого-геологические условия территорий, вовлекаемых в отработку и прилегающих к ним, при инженерно-экологических изысканиях [10–13].

Поэтому целью данной работы является рассмотрение особенностей техногенных воздействий на экосистемы со стороны разрабатываемых карьеров строительных известняков, а также привлечение внимания специалистов к тому, что в ходе инженерно-экологических изысканий необходимо учитывать разнообразие негативных последствий разработки изначально нейтрального к среде сырья. Для этого необходимо решить следующие задачи: (1) выявить наличие техногенного воздействия со стороны разрабатываемого месторождения строительных известняков; (2) оценить

его масштабы и характер; (3) дать количественную оценку техногенного химического загрязнения геологической среды в районах разработки МСМ; (4) обосновать и сформулировать рекомендации по совершенствованию инженерно-экологических изысканий на территориях МСМ.

### Геологические особенности Пятавского месторождения известняков

Известняки, добываемые в Дзержинском районе Калужской области с 30-х гг. XX в., приурочены к тарусскому, веневскому, михайловскому и алексинскому горизонтам нижнего карбона и представляют собой непрерывную залежь, расположенную в треугольнике «Полотняный Завод–Товарково–Пятавский» (рис. 2). Данные известняки разрабатываются в семи карьерах, суммарная производительность которых по строительному камню составляет более 3 млн м<sup>3</sup>/год [14]. Общая площадь, занятая карьерами, отвалами и промплощадками, равна 12,7 км<sup>2</sup>, что составляет 1% от территории Дзержинского района.

Ново-Пятавский карьер, входящий в состав Пятавской группы МСМ, существует с 1982 г. До 2004 г. работы по добыче известняка в нем велись здесь постоянно, с 2004 по 2010 г. — с перерывами. С начала 2011 г. работы в этом карьере были возобновлены, и сейчас ведется вскрытие полезной толщи в восточном направлении (рис. 3).

Ниже приводится описание геологических особенностей данного месторождения согласно сведениям, полученным ООО «ПГП «Притяжение»» в ходе объектного мониторинга геологической среды при эксплуатации Ново-Пятавского участка Пятавского месторождения известняков в Дзержинском районе под руководством В.Н. Вардугина в 2002 г.

Рассматриваемая территория представляет собой приподнятую пологоволнистую равнину, понижающуюся в сторону реки Суходрева. Водоразделы четко выражены, междуречья широкие (2 км и более). Наиболее высокие отметки поверхности приурочены к водоразделу рек Медынка и Шаня (211 м), минимальные — в русле р. Суходрева (126 м). Рельеф пересеченный,

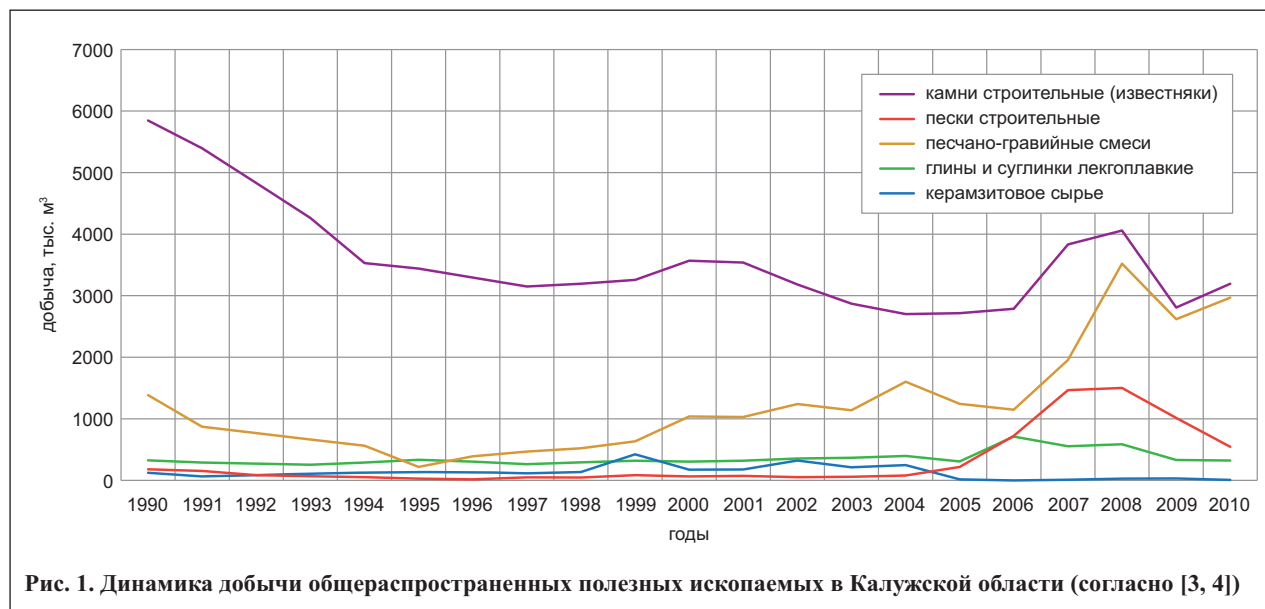


Рис. 1. Динамика добычи общераспространенных полезных ископаемых в Калужской области (согласно [3, 4])

гидрографическая сеть развита хорошо. Притоки рек Медынки и Сухорева глубоко врезаются, склоны их долин имеют крутизну до 45°. Характерно широкое развитие овражно-балочной сети. Овраги имеют глубину 40–50 м и крутые задернованные борты.

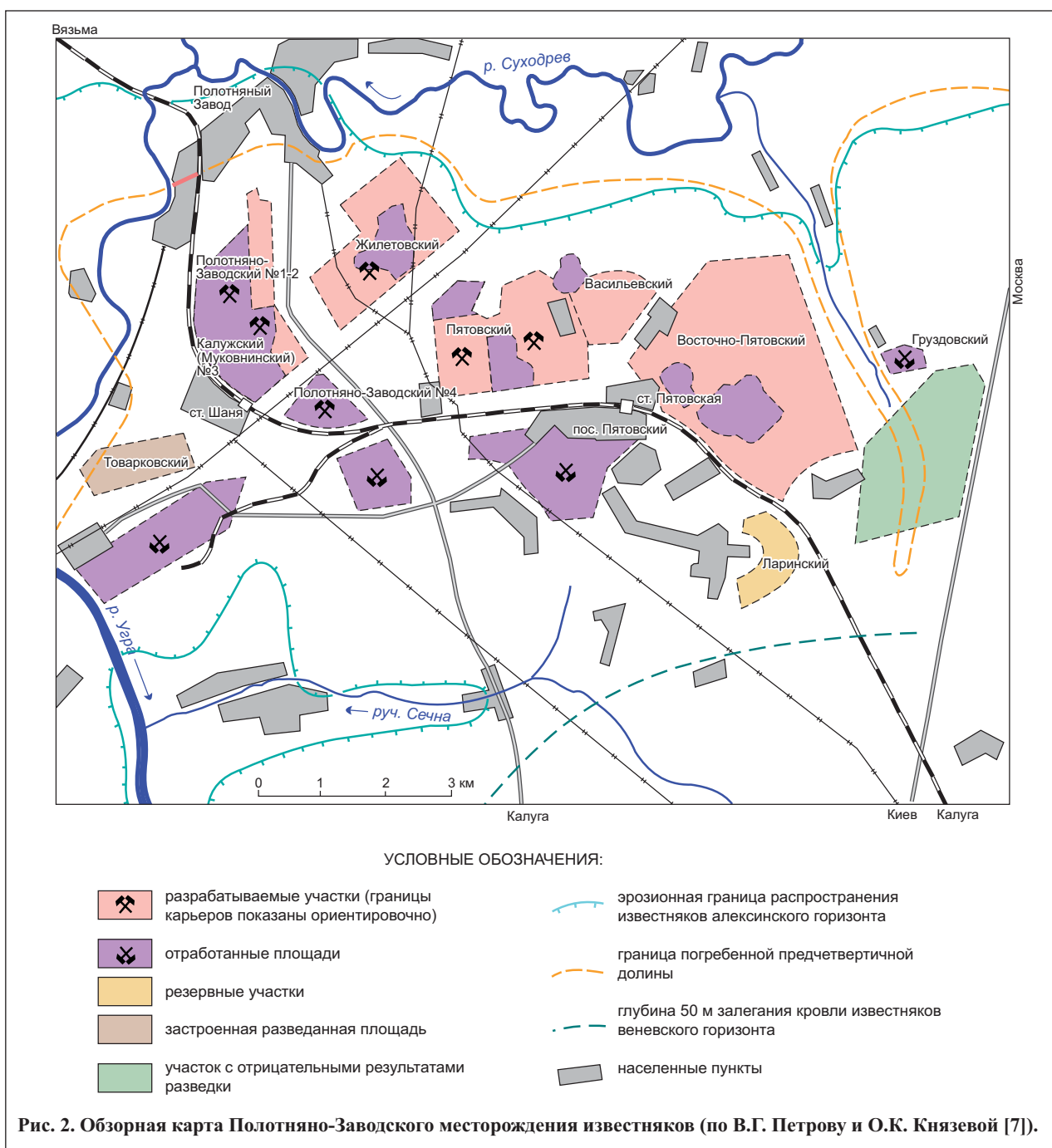
В геологическом строении района разработки принимают участие каменноугольные, верхнеюрские, меловые, неогеновые и четвертичные отложения.

Полезная толща известняков, перспективная для разработки, подстилается угленосной толщей континентальных песчано-глинистых отложений бобриковского и тульского горизонтов нижнего карбона мощностью до 50–80 м. Неустойчивость тектонического режима в период ее формирования привела к довольно заметной фациальной изменчивости отложений как по площади, так и по разрезу.

Карбонатная формация продуктивной толщи начинается с алексинского горизонта нижнего карбона и

завершается породами протвинского горизонта среднего карбона. Общая мощность комплекса достигает 50–60 м. В составе формации преобладают известняки, среди которых выделяются различные по мощности (от 2–3 до 20 м) прослои глин михайловского, стешевского и верейского водоупорных горизонтов. Рельеф кровли отложений весьма сложен: в долине реки Угры под четвертичными отложениями на ряде участков залегают известняки упинского горизонта, а в северо-восточной части района в разрезе появляются известняки протвинского горизонта. Значительное влияние на гипсометрию их кровли оказала тектоника, в частности Калужская кольцевая вулканотектоническая структура.

Региональный верхнеюрский водоупор в виде линз мощностью до 5–10 м распространен в районе незначительно и отмечается на водоразделах в виде небольших останцов в углублениях доюрского рельефа.



Глинисто-песчаный комплекс меловых отложений представлен фрагментарно в пределах контура развития юрских пород на водораздельных участках.

Отложения четвертичного возраста различного генезиса имеют широкое распространение на территории района, однако преобладают моренные суглинки московского возраста. Мощность отложений колеблется от 3–5 до 15–20 м.

В пределах зоны активного взаимодействия человека и геологической среды подземные воды развиты в четвертичных, мезозойских и каменноугольных отложениях. Всего в районе выявлено 17 водоносных горизонтов, в т.ч. 8 из них — в четвертичных образованиях.

Наибольшее значение для сельского населения имеют подземные воды, залегающие в межморенных песчаных отложениях и эксплуатирующиеся многочисленными колодцами. Для централизованного водоснабжения в большинстве случаев используются подземные воды, приуроченные к известнякам веневско-тарусского, алексинского и упинского горизонтов. Воды нижнетульской песчаной толщи эксплуатируются значительно реже. Водоносные горизонты залегают на глубине от 20–30 до 100 м и имеют различную степень естественной защищенности. Водоносные горизонты веневско-тарусского и алексинского горизонтов слабо напорные или безнапорные, а нижнетульского и упинского — напорные, с глубиной залегания уровней от 10 до 40–50 м и напором над кровлей от 5 до 50–60 м.

Ново-Пятовский участок в геоморфологическом отношении расположен на высоких отметках (от 190 до 206 м) водораздела рек Суходрева и Шани, удаленных от месторождения на расстояния 2 и 5 км соответственно. Ближайшие урезы рек находятся на абсолютных отметках 125–131 м. Абсолютные отметки подошвы полезной толщи алексинских известняков составляют 149–161 м.

В структурном отношении месторождение приурочено к Пятовскому поднятию Калужской кольцевой структуры. Характерной особенностью месторождения является малая мощность перекрывающих четвертичных отложений, высокое положение продуктивной толщи известняков относительно местного базиса эрозии, отсутствие устойчивых источников восполнения запасов подземных вод.

Современные экзогенные геологические процессы (ЭГП) в рассматриваемом районе проявляются в виде овражной эрозии, карста, суффозии, оползней. Всего по Дзержинскому району воздействию ЭГП подвержено 19 населенных пунктов, в т.ч. 3 города и поселка городского типа. В целом пораженность территории района ЭГП слабая. Однако отмечается резкая активизация этих процессов в связи с возрастанием техногенной нагрузки, включая разработку карьеров. Ярким примером является территория Троицкой бумажной фабрики (г. Кондрово), где суффозионные и карстовые процессы привели к выходу из строя основных зданий этого пред-

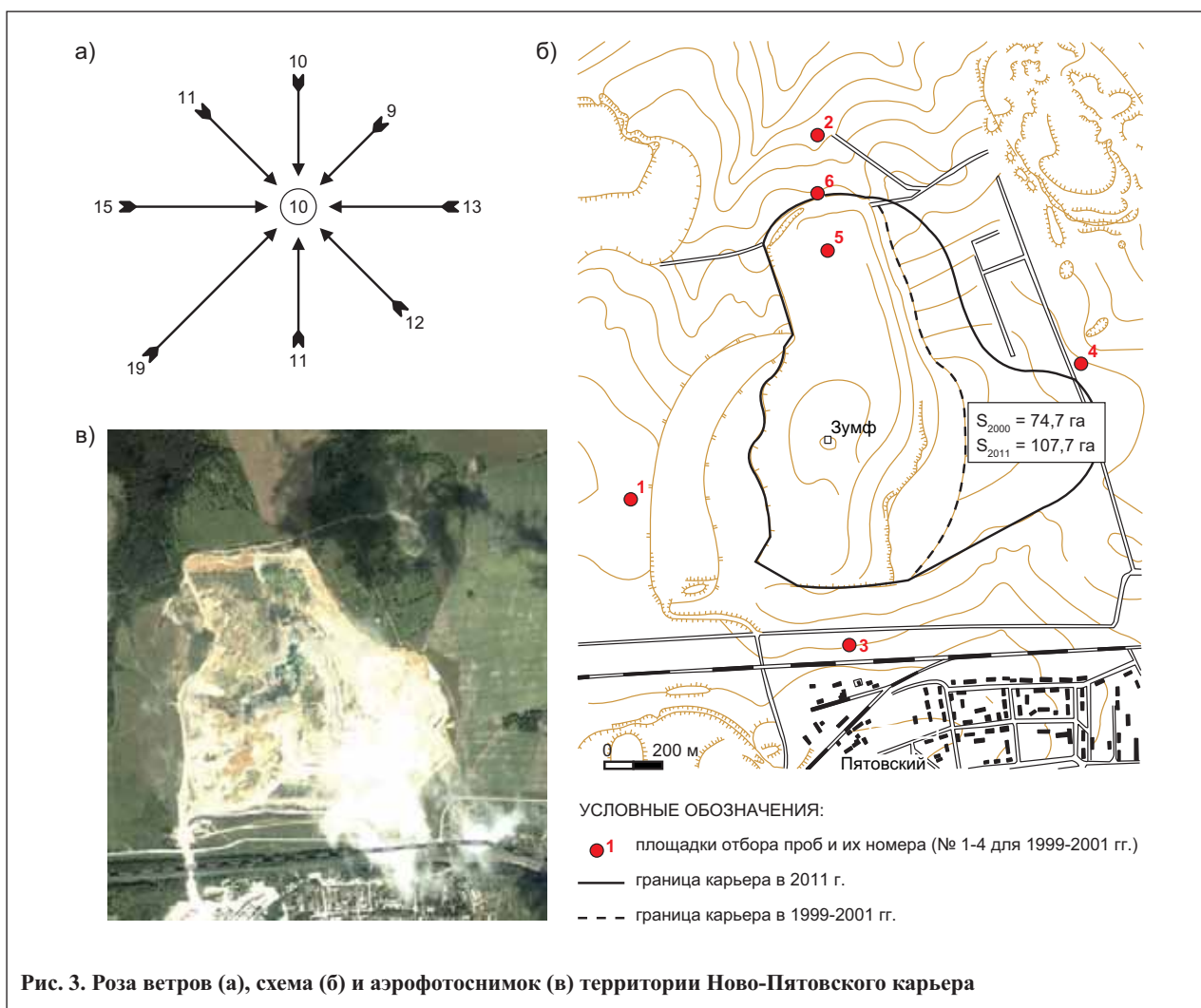


Рис. 3. Роза ветров (а), схема (б) и аэрофотоснимок (в) территории Ново-Пятовского карьера



Рис. 4. Заболачивание отработанной площади

приятия и переносу их в другое место в конце XX в. Причиной их резкой активизации явились мощный водоотбор (при одновременной работе 6–12 скважин, откачивавших 700 м<sup>3</sup>/ч) и попадание большого количества агрессивных технических вод в водоносный горизонт. Водоотлив из карьера «Ново-Пятовский» в течение последних 30 лет (вне зависимости от интенсивности добычных работ) составляет 200 м<sup>3</sup>/ч, что может привести (либо уже привело) к активизации карстовых процессов, проявления которых отмечены в 300–400 м к востоку и северо-востоку от бровки карьера.

#### **Техногенные воздействия разработки МСМ на эколого-геологические системы**

В целом МСМ в период разработки представляют собой сложные природно-технические системы (ПТС). Негативное воздействие разработка МСМ оказывает

на разные компоненты ПТС: геологическую среду, приземную атмосферу и биоту (рис. 4).

Основными источниками загрязнения служат техногенные объекты, являющиеся неотъемлемой частью разработки МСМ и составляющие техногенную компоненту ПТС (добычная и обогащательная техника, автотранспорт, транспортные сооружения, включая сопутствующие строения и подъездные технологические дороги, системы электроснабжения и водообеспечения) [15].

При этом в *геологической среде* происходит следующее:

- изменение литологических типов и гранулометрического состава приповерхностных отложений в целом по области в сторону увеличения их глинистости;
- изменение термовлажностного состояния грунтов;
- изменение физических, физико-химических и физико-механических свойств грунтов;



Рис. 5. Одновременное снятие почвенно-растительного покрова и вскрышных пород. Угол откоса вскрышного уступа значительно круче рекомендованных 40°



Рис. 6. Углы откоса добычных уступов, близкие к вертикальным: а — 1-й добычный уступ при возобновлении работ в 2011 г.; б — уступы бортов карьера, оставленные без консервации на период прекращения добычных работ (2004–2010 гг.) и самовыполаживающиеся за счет эрозионных и гравитационных процессов

- изменение напряженного состояния грунтов;
- химическое и бытовое загрязнение грунтов отходами производства и функционирования карьера;
- уничтожение плодородного почвенного слоя на площади отторжения;
- химическое и механическое загрязнение почв сопредельных территорий;
- нарушение режима подземных вод, прежде всего грунтовых, реже — более глубоких горизонтов, возникновение депрессионных воронок;
- механическое и химическое загрязнение подземных вод, ухудшение качества воды;
- изменение режима прилегающих к территории МСМ поверхностных вод, ухудшение качества воды, ее механическое и химическое загрязнение;
- формирование и активизация гравитационных инженерно-геологических процессов (оползней, обвалов, осыпей, оплывин, сплывов), а также выветривания, эрозии и в ряде случаев карста;
- изменение рельефа за счет разработки карьера и образования отвалов, приводящее помимо формирования техногенных отрицательных и аккумулятивных форм к созданию площадей искусственных обнажений;
- усиление антропогенной фрагментации рельефа.

В *воздушной среде* наблюдается:

- загрязнение атмосферного воздуха пылью и выхлопами карьерного автотранспорта;
- загрязнение воздуха за счет роста пылимости вскрытых пород.

В *биоценозах* наблюдается:

- уничтожение растительности на площади отторжения и ее угнетение; нарушение биогеохимических циклов растений и деградация естественных популяций растительности прилегающих площадей;
- гибель почвенных организмов в связи с уничтожением, нарушением либо загрязнением почвенного покрова;
- ухудшение качества среды обитания насекомых, птиц и животных (световое, шумовое, пылевое и химическое загрязнение);
- изменение естественных границ ареалов распространения видов;
- усиление инсультризации видов;
- непреднамеренное уничтожение особей в процессе разработки;
- увеличение числа «сорных» видов растений, насекомых и других животных (птиц, грызунов) на тер-

риториях нерекультивированных карьеров, превращенных в свалки.

В отношении *людей*, работающих на территории МСМ или проживающих на прилегающих территориях, происходит:

- ухудшение санитарно-гигиенических условий труда;
- ухудшение среды проживания за счет ее светового, шумового, пылевого и химического загрязнения.

Помимо объективных факторов ситуацию осложняет и то, что зачастую отработка МСМ ведется частными некомпетентными компаниями с нарушениями природоохранного законодательства с целью извлечения максимальной прибыли. Наиболее распространенные нарушения технологических проектных решений при отработке месторождений известняка состоят в следующем:

- плодородный почвенный слой не снимается в подготовительный период, а складывается совместно с остальной вскрышей (рис. 5);
- отвалы перемещаются по мере продвижения фронта добычных работ без отсыпки проектных отвальных площадей, что приводит к ухудшению качества грунта, используемого в дальнейшем для рекультивации;
- не соблюдаются рекомендованные углы откосов как вскрышных, так и добычных уступов бортов карьеров: — для известняков они составляют 80° вместо закладываемых проектом 60° (рис. 6); — в случае вскрышных уступов углы откосов составляют 60° при рекомендуемых 35–40° (см. рис. 5);
- отсутствует система пылеуловителей, в связи с чем приземный атмосферный воздух загрязнен аэрозолем известняковой пыли, значительно превышающей по содержанию значения ПДК; практически вся прилегающая территория, включая садовые участки и жилые постройки, загрязнена известняковой пылью (рис. 7).

Все это наносит серьезный ущерб окружающей, в т.ч. геологической, среде и экосистемам площадей отработки МСМ в целом, а также затрудняет последующую рекультивацию территорий.

### **Эколого-геологические особенности территории Ново-Пятовского участка Пятовского месторождения**

Основным источником загрязнения среды тяжелыми металлами (ТМ) и полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) при отработке МСМ являются



Рис. 7. Обочина технологической дороги карьера с «новообразованиями» из многолетней известняковой пыли (на втором плане — решетка ограждения моста путепровода)

выхлопы от работающего карьерного транспорта. В случае Ново-Пятовского карьера это бульдозеры, применяемые на вскрышных работах, и автосамосвалы, вывозящие горную массу, поскольку на карьере используются экскаваторы с электродвигателями. Кроме этого, источником химического загрязнения служат взрывные работы, проводившиеся на карьере в 1982–2004 гг. и недавно (с осени 2011 г.) возобновленные.

В 1999–2001 гг. на Ново-Пятовском карьере была предпринята попытка ведения эколого-геологического мониторинга. В состав работ входил отбор проб растительности и почвы на четырех фиксированных площадках вблизи карьера. К сожалению, в 1999 г. выбор площадок носил специфический характер, что было связано с финансированием работ руководством самого карьера. Наблюдательные площадки № 3 и 4 (см. рис. 3) были расположены в непосредственной близости от автодорог, не входящих в коммуникации собственно карьера, причем именно за трассами, поэтому на них было возможно отслеживание загрязнения, вызванного выхлопами автотранспорта вообще, но никак не относящегося к карьерному транспорту. Площадка № 2 расположена на некотором удалении от карьера в естественном понижении рельефа и имеет кустарниковую растительность — здесь влияние карьера минимально (см. рис. 3). Площадка № 1 находится в 400 м к З-ЮЗ от карьера за складом отвалных масс, что тоже препятствует отслеживанию воздействия разработки. Однако указанные исследования — единственные, проводившиеся ранее в Калужской области. Поэтому авторами на тех же площадках были выполнены повторные инженерно-экологические исследования спустя более чем 10 лет, что позволило отследить динамику различных процессов.

По почвенному районированию Калужской области Дзержинский район входит в Малоярославецкий почвенный район Смоленско-Московского округа с преобладанием дерново-подзолистых почв, занимающих около 71,5% территории района. На площади месторож-

дения развиты дерново-среднеподзолистые среднесуглинистые почвы. Они характеризуются небольшой мощностью перегнойного горизонта  $A_1$  (10–20 см), причем подзолистый горизонт  $A_2$  имеет мощность около 10 см. Эти почвы бедны гумусом и питательными веществами, имеют кислую реакцию почвенного раствора и непрочную структуру, поэтому плодородие их сравнительно невысоко [2]. Для почв Дзержинского района  $pH = 5,8$ , а содержание гумуса составляет 1,61% [4].

Данные почвы обладают умеренной способностью к самоочищению, вероятное время разложения органических и минеральных продуктов техногенеза в них составляет от 7 до 100 лет.

Грунты, подстилающие почвы, в основном представлены моренными суглинками московского горизонта, для которых характерны малая пластичность и высокая плотность.

### Методика исследований

В 2011 г. авторами для химических анализов был произведен повторный отбор проб растительности и почв на тех же наблюдательных площадках, которые были выбраны для исследования в 1999 г. Дополнительно на этих площадках были отобраны пробы подстилающих грунтов. Кроме этого, были отобраны пробы воды из заболоченного участка непосредственно в карьере и из карьерного водоотлива.

К настоящему времени благодаря движению фронта добычных работ, а также переселению жителей п. Васильевского карьера и закрытию дороги к данному поселку площадка № 4 оказалась в непосредственной близости от карьера — расстояние до его восточного борта составляет около 30 м. Кроме того, была обследована дополнительная площадка № 6, расположенная в 10 м к северу от его северного борта. Обе площадки находятся с подветренной стороны от карьера, по направлению преобладающих ветров района.

Методика эколого-геохимических исследований состояла в отборе и изучении проб травянистых растений, почвы и подпочвенных грунтов с их последующим химическим анализом для определения содержания в них токсичных компонентов, прежде всего ТМ и ПАУ, а также микроэлементов.

Токсикологическое исследование проб почвы и золь растений на содержание тяжелых металлов в 1999–2001 гг. проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии в ООО «ИЛКПЭ» (г. Калуга) — аккредитованной испытательной лаборатории по качеству пищевых продуктов, продовольственного сырья и экологии; в 2011 г. — рентгено-эмиссионным методом на приборе «СПЕКТРОСКАН» на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством Е.Н. Самарина [13].

Определение содержания ПАУ проводилось методом ВЭЖХ на комплексе Lab Alliance с колонкой C-18 в градиентном режиме в лаборатории мониторинга ПАУ в окружающей среде ГУ «НПО «Тайфун»» (г. Обнинск) под руководством А.И. Шилиной.

Сравнение результатов анализов 1999–2001 и 2011 гг. позволило сделать определенные выводы по динамике загрязнений в районе Ново-Пятовского карьера и оценить таким образом влияние его разработки на эколого-геологические условия прилегающей территории и самого МСМ [10, 12, 13].

В районе площадок № 1, 3, 4, 6 также был произведен отбор проб из приземного слоя воздуха методом пассивного пробоотбора. Фильтры ФПП-15 с полезной площадью поверхности 100 см<sup>2</sup> были установлены на указанных площадках сроком на 2 недели на уровне расположения органов дыхания (1,5 м).

## Загрязнение тяжелыми металлами

В результате исследований химического состава почв на прилегающей к Ново-Пятовскому карьеру территории, проведенных в 2001 и 2011 гг., было выявлено повышенное содержание в них мышьяка, свинца и селена, а также наличие стронция и цезия (табл. 1). Но в связи с отсутствием анализов почвенного состава на предпроектной стадии (т.е. фоновых исходных параметров) точно установить, является ли их источником собственно разработка месторождения, не представляется возможным. Тем не менее в этой ситуации сравнение можно провести в отношении кларков анализируемых веществ для почв мира по А.П. Виноградову [5]. В 2011 г. содержание мышьяка, меди, кобальта, свинца, никеля, цинка, стронция, кадмия на исследуемых участках составило 1,3–2,2; 0,4–1,1; 0,0–1,1; 1,9–5,4; 0,0–0,3; 0,7–1,9; 0,3–1,0; 0,3–7,24 кларка соответственно. При этом ПДК на всей исследованной площади по мышьяку превышены в 3,3–5,6 раза, по сере — в 2,9–3,9 раза.

При сопоставлении литературных данных и результатов собственных исследований почв территории, прилегающей к карьеру [13], становится очевидным, что концентрации кобальта и никеля не превышают фоновое содержание этих элементов, содержание меди и цинка несколько выше фоновое, а концентрация свинца превышает фоновую в 2,3–6,7 раза.

Из таблицы 1 также следует, что по сравнению с 2001 г. концентрации мышьяка, меди и свинца к 2011 г. существенно выросли на всех обследованных площадках, несмотря на длительный перерыв в работе карьера.

Кроме того, на всех площадках наблюдается высокое содержание мышьяка (рис. 8). Оно варьирует в основном от 6,36 мг/кг (площадка № 6, интервал 1,45–1,5 м) до

Таблица 1

| Содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почве (мг/кг) на территории, прилегающей к Ново-Пятовскому карьеру |      |       |       |       |       |       |        |        |        |                |        |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------------|--------|--------|
| № площадки                                                                                                        | Год  | As    | Cu    | Co    | Pb    | Ni    | Zn     | Sr     | Cs     | V              | Cd     | S      |
| 1                                                                                                                 | 2001 | 4,45  | 7,95  | -     | 9,25  | -     | -      | -      | -      | -              | 0,08   | -      |
|                                                                                                                   | 2011 | 11,19 | 20,33 | 8,62  | 53,60 | 10,11 | 90,00  | 102,10 | 4,58   | 84,86          | 0,62   | 548,48 |
| 2                                                                                                                 | 2001 | 1,85  | 5,20  | -     | 8,30  | -     | -      | -      | -      | -              | 0,19   | -      |
|                                                                                                                   | 2011 | 9,67  | 9,00  | 5,30  | 18,50 | 0,00  | 34,86  | 99,45  | 4,10   | 51,25          | 0,14   | 617,21 |
| 3                                                                                                                 | 2001 | 3,45  | 16,50 | -     | 13,00 | -     | -      | -      | -      | -              | 0,33   | -      |
|                                                                                                                   | 2011 | 6,54  | 21,54 | 5,26  | 31,08 | 13,13 | 54,32  | 127,00 | 4,89   | 56,87          | 0,91   | 532,30 |
| 4                                                                                                                 | 2001 | 2,90  | 7,70  | -     | 12,00 | -     | -      | -      | -      | -              | 0,29   | -      |
|                                                                                                                   | 2011 | 8,60  | 7,70  | 5,58  | 21,07 | 0,00  | 43,58  | 96,89  | 5,54   | 71,88          | 0,15   | 583,99 |
| 6                                                                                                                 | 2001 | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -      | -      | -              | -      | -      |
|                                                                                                                   | 2011 | 8,74  | 11,40 | 0,00  | 41,30 | 11,48 | 95,64  | 306,18 | 2,37   | 52,12          | 3,63   | 462,14 |
| ПДК                                                                                                               | 2,00 | 3,00* | 5,00  | 32,00 | 4,00  | 23,00 | -      | -      | 150,00 | 2,00 (ОДК max) | 160,00 | -      |
| Кларк [2]                                                                                                         | 5,00 | 20,00 | 8,00  | 10,00 | 40,00 | 50,00 | 300,00 | -      | 100,00 | 0,50           | -      | -      |
| Фон (Наро-Фоминский р-н Московской обл.)                                                                          | -    | 11,00 | 8,00  | 8,00  | 16,00 | 40,00 | -      | -      | -      | -              | -      | -      |

\* Жирным курсивом даны ПДК подвижных форм элементов.

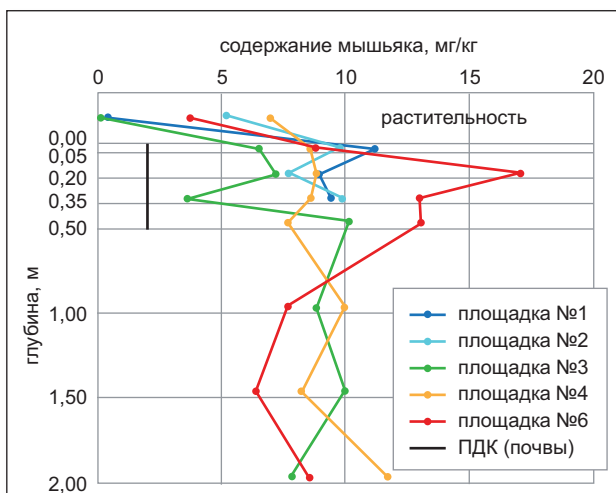


**Рис. 8. Изменения концентрации мышьяка в растительности, почвах и подпочвенных грунтах в зависимости от глубины на территории Ново-Пятовского карьера**

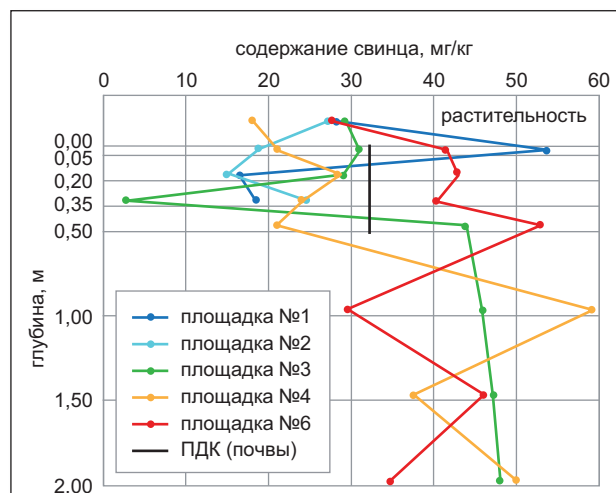


**Рис. 9. Изменения концентрации свинца в растительности, почвах и подпочвенных грунтах в зависимости от глубины на территории Ново-Пятовского карьера**

11,76 мг/кг (площадка № 4, интервал 1,95–2,0 м) с незначительными колебаниями по глубине. Исключение составляет площадка № 6 в интервале глубины 0,05–0,50 м, для которого концентрация мышьяка изменяется от 13,04 до 17,11 мг/кг. Такое ее повышение, вероятно, связано с наложением техногенного загрязнения на естественный уровень концентраций. Присутствие пикового значения в интервале 0,05–0,20 м, видимо, обусловлено миграцией As в почвенном профиле при длительном прекращении добычных работ до недавнего времени.

Содержание свинца на всех площадках (рис. 9) при достаточно большом разбросе в интервалах 0,0–0,5 м (почвенный горизонт) с глубиной выравнивается и составляет в интервале 1,5–2,0 м от 34,9 до 49,6 мг/кг. В этой ситуации можно говорить либо о достаточно высоком естественном содержании свинца, либо о миграции данного элемента на глубину более 2,0 м.

Что касается содержания стронция (рис. 10), то для всех площадок характерны колебания его концентрации от 81,65 мг/кг (площадка № 4, интервал 1,95–2,00 м) до 148,5 мг/кг (площадка № 3, интервал 1,95–2,00 м). Исключение составляет площадка № 6 в интервале 0,0–0,5 м, для которой концентрация стронция варьирует в пределах 266,4–307,4 мг/кг.

Выявленные зависимости распределения различных элементов в системе «растение — почва — подстилающий грунт» на площадках № 3, 4 и 5 показаны на рис. 11. Примечательно, что в пробах всего участка исследований наблюдается высокое содержание серы, изменяющееся от 399,1 мг/кг (площадка № 4, интервал 1,95–2,0 м) до 620,99 мг/кг (площадка № 1, интервал 0,20–0,35 м) и имеющее незначительные колебания на разной глубине. Как и в случае со свинцом, здесь можно говорить либо о достаточно высоком естественном содержании серы по всему разрезу, либо о миграции данного элемента на глубину более 2,0 м. Тогда наиболее вероятным источником ее поступления служат выхлопные газы транспортных средств и карьерной техники. Как следует из рис. 11, наиболее сильно растительность обогащена такими элементами, как медь и никель.

Влияние тяжелых металлов на биоту весьма разнообразно и зависит от их содержания в окружающей среде

и от потребности в них микроорганизмов, растений, животных и человека. Например, избыток свинца в растениях, связанный с его высокой концентрацией в почве, ингибирует их дыхание и подавляет процесс фотосинтеза, иногда приводит к увеличению содержания кадмия и снижению поступления в них цинка, кальция, фосфора, серы. Вследствие этого снижается урожайность растений и резко ухудшается качество производимой продукции. Концентрация этого металла выше 10 мг на 1 кг сухого вещества является токсичной для большинства культурных растений [16]. В организм человека свинец в основном поступает через пищеварительный тракт. При токсичных дозах этот элемент накапливается в почках, печени, селезенке и костных тканях. При свинцовом отравлении поражаются в первую очередь органы кроветворения (возникает анемия), нервная система (энцефалопатия и нейропатия) и почки (нефропатия). Особенно восприимчивы к свинцу дети [16].

Кадмий хорошо известен как токсичный элемент, но он же в низких концентрациях способен стимулировать рост некоторых животных [16]. Его токсичность

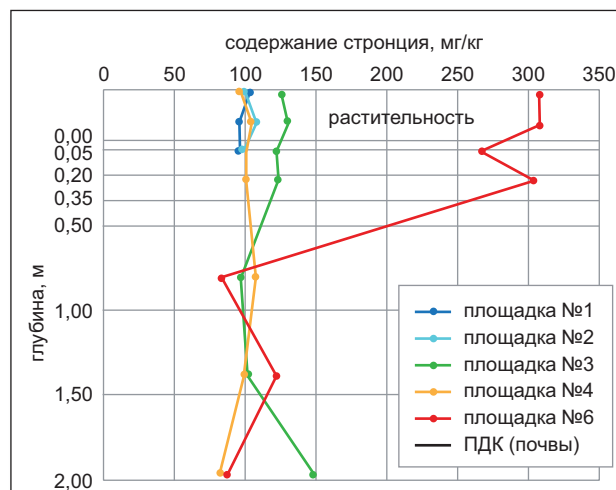


**Рис. 10. Изменения концентрации стронция в почвах и подпочвенных грунтах в зависимости от глубины на территории Ново-Пятовского карьера**

для растений проявляется в нарушении активности ферментов, торможении фотосинтеза, нарушении транспирации, а также в ингибировании восстано-

вления  $\text{NO}_2$  до  $\text{NO}$ . Кроме того, в метаболизме растений кадмий является антагонистом ряда элементов питания (Zn, Cu, Mn, Ni, Se, Ca, Mg, P). При токсичном воздей-

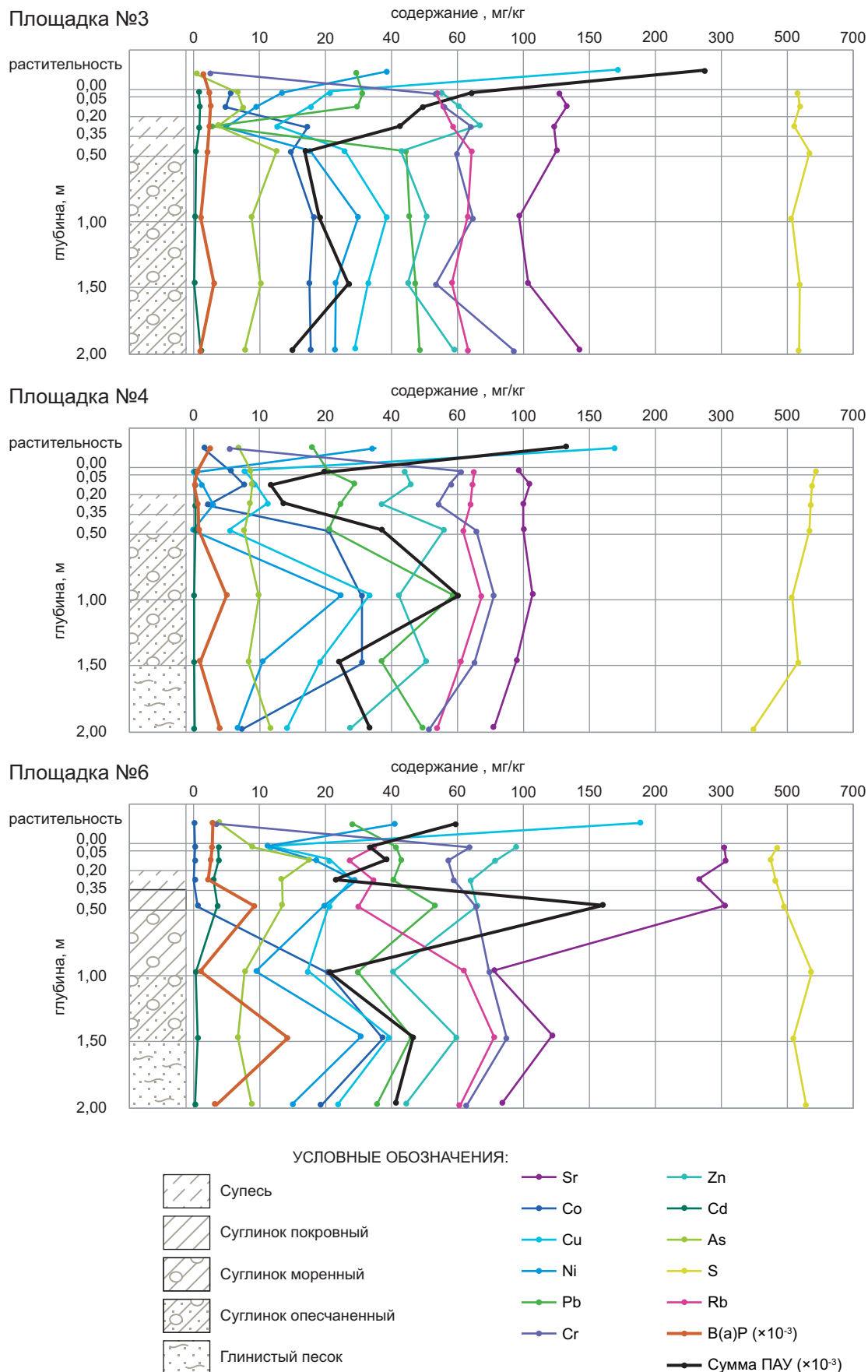
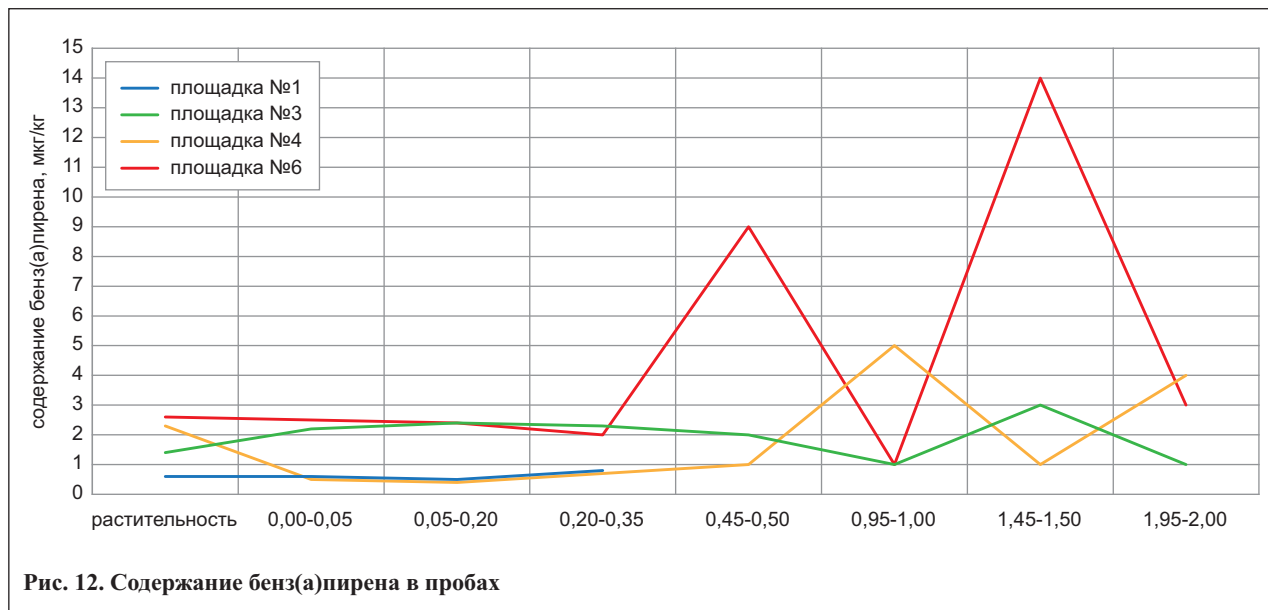


Рис. 11. Закономерности распределения ТМ и ПАУ в системе «растение — почва — подстилающий грунт»



ствии этого металла у растений наблюдаются задержка роста, повреждение корневой системы и хлороз листьев. Кадмий достаточно легко поступает в растения из почвы и атмосферы. По фитотоксичности и способности накапливаться в растениях в ряду ТМ он занимает первое место ( $Cd > Cu > Zn > Pb$ ) [16].

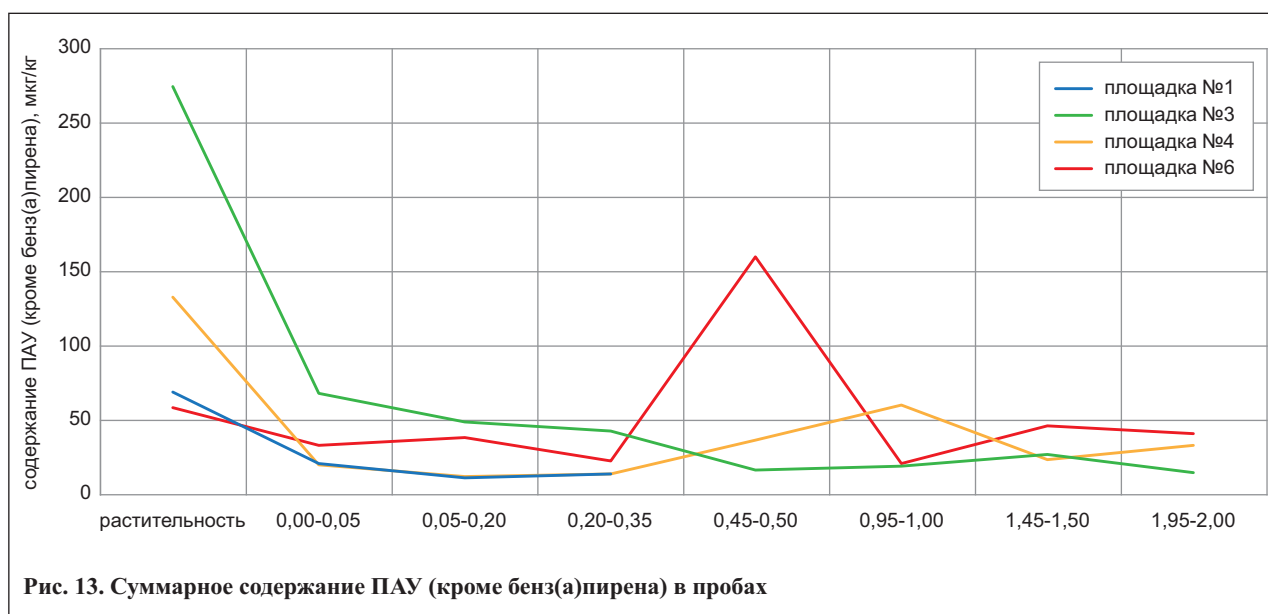
Кадмий способен накапливаться в организме человека и животных, т.к. сравнительно легко усваивается из пищи и воды и проникает в различные органы и ткани. Токсичное действие данного металла проявляется уже при очень низких концентрациях. Его избыток ингибирует синтез ДНК, белков и нуклеиновых кислот, влияет на активность ферментов, нарушает усвоение и обмен других микроэлементов (Zn, Cu, Se, Fe), что может вызвать их дефицит [16]. Обмен кадмия в организме характеризуется отсутствием эффективного механизма гомеостатического контроля, длительным удержанием (кумуляцией) в организме с очень долгим периодом полувыведения (около 25 лет), преимущественным накоплением в печени и почках, интенсивным взаимодействием с другими двухвалентными металлами как в процессе всасывания, так и на тканевом уровне [16]. Хрони-

ческое воздействие кадмия на человека приводит к нарушениям почечной функции, легочной недостаточности, остеомалации, анемии и потере обоняния [16].

Повышенная концентрация **цинка** также оказывает токсическое влияние на живые организмы. У человека она вызывает тошноту, рвоту, дыхательную недостаточность, фиброз легких, оказывает канцерогенное действие. Однако токсичность цинка для животных и человека сравнительно невелика, т.к. при избыточном поступлении он не кумулируется, а выводится. Большинство видов растений обладает высокой толерантностью к его избытку в почвах. Уникальность цинка заключается в том, что он входит в состав более 200 ферментов, а также необходим для стабилизации ДНК, РНК, рибосом. Поэтому **большую** проблему для биоты в целом представляет дефицит цинка, нежели его токсичные количества.

Период естественного полувыведения цинка из почв составляет до 500 лет, кадмия — до 1100 лет, меди — до 1500 лет, свинца — до нескольких тысяч лет [16].

Примечательно, что при разработке известняков, сопровождающейся высоким пылевыведением, а следо-





вательно, и повышением рН почв прилегающих территорий, возможно получение положительного эффекта, поскольку при высоких значениях рН свинец закрепляется в почве химически в виде его карбоната.

### Загрязнение полициклическими ароматическими углеводородами

В 2011 г. было проведено исследование указанной территории МСМ на предмет изучения загрязнения почв полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) [10, 12]. Как известно, ПАУ представляют собой сложные органические соединения, состоящие из 3–6 бензольных колец. Ряд ПАУ обладает канцерогенными, мутагенными или токсическими свойствами.

В отобранных пробах авторами определялось 16 приоритетных ПАУ (табл. 2). Из них в образцах преобладали 9: бенз(а)пирен (B(a)P), фенантрен (Phen), антрацен (Antr), флуорантен (Flt), пирен (Pyr), бенз(а)антрацен и хризен (BaA+Chrys), бенз(б)флуорантен и бенз(к)флуорантен (BbF+BkF). Бензперилен (BPL) присутствовал в пробах растений и подстилающего грунта, в почве его содержание было ниже предела обнаружения. То же справедливо и для флуорена, присутствие которого было обнаружено в подстилающем грунте в интервале 0,35–2,00 м. Дибенз(аh)антрацен (Db(аh)A) был выявлен только в подстилающем грунте площадок № 3 и 6 на глубине 0,45–2,00 м. Содержание остальных ПАУ оказалось ниже предела обнаружения. Из обнаруженных соединений B(a)P и дибенз(аh)антрацен (Db(аh)A) относятся к сильным канцерогенам и мутагенам; BbF — к сильным канцерогенам; BaA — к канцерогенам; Antr, Chrys и BPL — к мутагенам и сомнительным канцерогенам; Flt и BkF — к мутагенам [13].

Содержание бенз(а)пирена на всей площади, прилегающей к карьере, было ниже ПДК. Его фоновые значения для почв Калужской области составляют 0,5–2,3 мкг/кг. Уровень B(a)P в почве 4–5 мкг/кг свидетельствует (по данным ГУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск) о наличии его источника.

Однако при сравнении полученных данных с таковыми для площадки № 1 (которая благодаря значительному удалению как от карьерных разработок, так и от автотрассы может рассматриваться как фоновая) было выявлено превышение содержания бенз(а)пирена в растительности в 3,8–4,3 раза, в почве — в 4,3 раза, в подстилающем грунте — в 2,5 раза в пробах, отобранных на площадках, расположенных с подветренной стороны от карьера. В этих пробах также наблюдается значительное превышение уровня других ПАУ относительно их фонового содержания (рис. 12, 13).

Содержание бенз(а)пирена в растительности и почве, связанное исключительно с ведущейся разработкой МСМ, близко к его уровню, обусловленному выхлопами автотранспорта на площадке № 3, находящейся у автотрассы (см. рис. 12). Для площадок № 6 и 4 в подстилающих почву грунтах характерно значительное содержание B(a)P, превышающее уровень загрязнения в разрезе площадки № 3, что связано с миграцией бенз(а)пирена вглубь разреза и с наибольшим воздействием, оказанным в период непрерывной отработки карьера в 1982–2004 гг. (в три смены и с ведением бу-

взрывных работ). Наибольшая концентрация B(a)P наблюдается на площадке № 6 в интервалах глубин 0,45–0,50 и 1,45–1,50 м и составляет 9 и 14 мкг/кг соответственно.

Аналогичное распределение концентраций остальных ПАУ (см. табл. 2) свидетельствует о существенном воздействии, оказанном разработкой карьера в 1982–2004 гг. Максимальное суммарное содержание ПАУ в интервале 0,45–0,50 м площадки № 6 составляет 160 мкг/кг.

Для площадки № 3, растительность, почвы и подстилающие грунты которой длительное время испытывают постоянную техногенную нагрузку, характерно достаточно плавное снижение концентраций ПАУ с глубиной (см. рис. 11). Максимальные значения ПАУ наблюдаются в растительности и в интервале 0,00–0,05 м (в гумусовом горизонте почвы).

Наличие бензперилена и дибенз(аh)антрацена в интервале глубины 0,35–0,200 м, вероятно, обусловлено буровзрывными работами на протяжении длительного периода.

Для оценки источника поступления ПАУ авторами были использованы коэффициенты А и В, определяемые согласно работе [1] по следующим формулам:

$$A = (Pyr + B(a)P) / (Phen + Chrys);$$

$$B = Antr / (Antr + Phen).$$

При  $A > 1$  источник считается антропогенным, при  $B > 0,1$  источником считаются продукты горения (табл. 3).

Из приведенных данных следует, что доля техногенных источников загрязнения почв опасными ПАУ на территориях МСМ достаточно велика. Преимущество проведения анализа на содержание ПАУ состоит в том, что на его основе возможно провести оценку источника загрязнения даже при отсутствии исходных данных о химическом составе почв и грунтов. Однако в настоящее время на территориях МСМ, где предполагается разработка, такой анализ не проводится.

Было выявлено, что содержание бенз(а)пирена в воде из болота в северной части карьера (на площадке № 5) составляет 18,8 нг/л, что превышает ПДК (5 нг/л) для воды хозяйственно-бытового пользования в 3,8 раза. В воде из водоотлива, сброс из которого производится вблизи площадки № 6, концентрация B(a)P оказалась равной 6,1 нг/л, что в 1,2 раза выше ПДК. При этом суммарное содержание остальных ПАУ составляет 300 и 166 нг/л в пробах с площадок № 5 и 6 соответственно. Результаты этих исследований приведены в табл. 4.

Поскольку вода из водовода самотеком попадает в безымянный ручей, который далее впадает в р. Суходрев, косвенное воздействие карьера через поверхностный сток захватывает не только сам ручей, но и реку ниже его устья.

Результаты анализа проб воздуха на содержание ПАУ представлены в табл. 5. Закономерно, что наибольшие концентрации ПАУ, как видно из этой таблицы, наблюдаются в приземном слое воздуха вблизи шоссе (на площадке № 3), где суммарное содержание ПАУ достигло 308 нг/филтр, а превышение по бенз(а)пирену по сравнению с фоновым (на пло-

щадке № 1) равно 2,8. Однако содержание В(а)Р в фильтрах площадок № 4 и 6 также превышает фоновое в 2,1 и 3,9 раза, причем содержание бенз(а)пирена в фильтре площадки № 6 в 1,4 раза выше его содержания в фильтре, экспонированном в зоне влияния шоссе.

### Содержание ПАУ в приземном слое воздуха

Необходимо добавить, что помимо отмеченного химического загрязнения растительности, почв, подпочвенных грунтов и водных объектов на территориях карьеров, оставленных на длительный период без консервации, наблюдается ухудшение состояния известняка как полезного ископаемого. В частности, при проведении сертификации сырья Жилетовского карьера (соседнего с Ново-Пятовским) было выявлено значи-

тельное снижение прочностных характеристик, а именно ухудшение дробимости известняков алексинского горизонта: образцы сырья при небольшой глубине зачистки борта карьера (до 20 см) не имели характерных для данных пород показателей дробимости, ранее соответствовавших марке «600». Это вызвано длительным атмосферным и температурным воздействием на вскрытые отработкой отложения и техногенно активизированным выветриванием.

На участке разработки известняка собственно Ново-Пятовского участка в районе площадки № 6 наблюдается заболачивание значительной площади к северу от сброса воды из водовода, обусловленное вынужденным длительным (в течение 40 лет) водопонижением уровня алексинского водоносного горизонта (продолжающимся и настоящее время) и малым углом наклона поверхности (рис. 14).

Таблица 2

| Содержание ПАУ в системе «растительность–почва–подстилающий грунт»                                                                                                                                                                               |         |                |                         |       |      |      |      |           |         |         |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------|-------------------------|-------|------|------|------|-----------|---------|---------|------|------|
| № площадки                                                                                                                                                                                                                                       | № пробы | Интервал, м    | Содержание ПАУ*, мкг/кг |       |      |      |      |           |         |         |      |      |
|                                                                                                                                                                                                                                                  |         |                | B(a)P                   | Phen  | Antr | Flt  | Pyр  | BaA+Chrys | BbF+BkF | Db(ah)A | F    | BPL  |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                | 1-1P    | растительность | 0,6                     | 46,0  | 1,0  | 2,0  | 13,0 | 5,0       | 1,0     | 0,0     | 0,0  | 1,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 1-1A    | 0,00–0,05      | 0,6                     | 4,3   | 1,7  | 2,6  | 8,6  | 2,8       | 0,7     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 1-1B    | 0,05–0,20      | 0,5                     | 3,5   | 1,4  | 0,9  | 3,0  | 2,1       | 0,8     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 1-2     | 0,20–0,35      | 0,8                     | 5,7   | 2,3  | 0,8  | 3,0  | 1,4       | 0,5     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                | 3-1P    | растительность | 1,4                     | 114,0 | 6,0  | 60,0 | 85,0 | 4,0       | 3,0     | 0,0     | 0,0  | 3,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-1A    | 0,00–0,05      | 2,2                     | 16,0  | 6,4  | 10,0 | 32,0 | 2,7       | 1,2     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-1B    | 0,05–0,20      | 2,4                     | 11,4  | 4,6  | 7,0  | 23,0 | 2,4       | 1,0     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-2     | 0,20–0,35      | 2,3                     | 10,0  | 4,0  | 6,0  | 20,0 | 2,3       | 0,9     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-3     | 0,45–0,50      | 2,0                     | 3,0   | 2,0  | 0,0  | 7,0  | 2,0       | 0,0     | 3,0     | 90,0 | 3,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-4     | 0,95–1,00      | 1,0                     | 3,0   | 0,0  | 0,0  | 11,0 | 0,0       | 0,0     | 4,0     | 0,0  | 5,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-5     | 1,45–1,50      | 3,0                     | 3,0   | 2,0  | 4,0  | 10,0 | 2,0       | 0,0     | 5,0     | 20,0 | 6,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 3-6     | 1,95–2,00      | 1,0                     | 3,0   | 5,0  | 0,0  | 5,0  | 0,0       | 0,0     | 4,0     | 12,0 | 2,0  |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                | 4-1P    | растительность | 2,3                     | 110,0 | 3,0  | 1,0  | 13,0 | 3,0       | 1,0     | 0,0     | 0,0  | 2,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-1A    | 0,00–0,05      | 0,5                     | 6,6   | 2,6  | 1,8  | 6,0  | 2,8       | 0,2     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-1B    | 0,05–0,20      | 0,4                     | 4,7   | 1,9  | 0,9  | 3,0  | 0,8       | 0,6     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-2     | 0,20–0,35      | 0,7                     | 6,6   | 2,6  | 0,8  | 2,6  | 0,8       | 0,3     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-3     | 0,45–0,50      | 1,0                     | 8,0   | 25,0 | 0,0  | 0,0  | 2,0       | 0,0     | 0,0     | 30,0 | 2,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-4     | 0,95–1,00      | 5,0                     | 6,0   | 0,0  | 0,0  | 32,0 | 2,0       | 0,0     | 0,0     | 30,0 | 20,0 |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-5     | 1,45–1,50      | 1,0                     | 9,0   | 0,0  | 0,0  | 8,0  | 3,0       | 0,0     | 0,0     | 0,0  | 4,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 4-6     | 1,95–2,00      | 4,0                     | 7,0   | 1,0  | 0,0  | 7,0  | 10,0      | 0,0     | 0,0     | 20,0 | 8,0  |
| 6                                                                                                                                                                                                                                                | 6-1P    | растительность | 2,6                     | 32,0  | 2,0  | 4,0  | 9,0  | 9,0       | 1,0     | 0,0     | 0,0  | 2,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-1A    | 0,00–0,05      | 2,5                     | 7,7   | 3,1  | 3,8  | 16,0 | 2,7       | 0,2     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-1B    | 0,05–0,20      | 2,4                     | 9,0   | 3,6  | 5,5  | 18,0 | 1,6       | 0,5     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-2     | 0,20–0,35      | 2,0                     | 3,6   | 1,5  | 3,6  | 12,0 | 1,2       | 0,8     | 0,0     | 0,0  | 0,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-3     | 0,45–0,50      | 9,0                     | 6,0   | 13,0 | 0,0  | 78,0 | 53,0      | 0,0     | 12,0    | 0,0  | 10,0 |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-4     | 0,95–1,00      | 1,0                     | 2,0   | 4,0  | 0,0  | 10,0 | 2,0       | 0,0     | 3,0     | 30,0 | 3,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-5     | 1,45–1,50      | 14,0                    | 19,0  | 2,0  | 0,0  | 14,0 | 10,0      | 0,0     | 2,0     | 0,0  | 1,0  |
|                                                                                                                                                                                                                                                  | 6-6     | 1,95–2,00      | 3,0                     | 10,0  | 2,0  | 0,0  | 12,0 | 14,0      | 0,0     | 2,0     | 26,0 | 3,0  |
| ПДК (почвы)                                                                                                                                                                                                                                      |         |                | 20,0                    | -     | -    | -    | -    | -         | -       | -       | -    | -    |
| * B(a)P — бенз(а)пирен; Phen — фенантрен; Antr — антрацен; Flt — флуорантен; Pyр — пирен; BaA — бенз(а)антрацен; Chrys — хризен; BbF — бенз(б)флуорантен; BkF — бенз(к)флуорантен; BPL — бензперилен, Db(ah)A — дибенз(аh)антрацен, F — флуорен. |         |                |                         |       |      |      |      |           |         |         |      |      |

Таблица 3

| Оценка источника загрязнения исследуемой территории ПАУ |         |     |        |
|---------------------------------------------------------|---------|-----|--------|
| № площадки                                              | № пробы | A   | B      |
| 1                                                       | 1-1A    | > 1 | > 0,1  |
| 3                                                       | 3-1A    | > 1 | > 0,1  |
| 4                                                       | 4-1A    | < 1 | > 0,1  |
| 6                                                       | 6-1A    | > 1 | > 0,1ф |

## Рекомендации

В результате проведенных инженерно-экологических исследований можно сформулировать некоторые рекомендации по улучшению сложившейся на рассматриваемой территории экологической ситуации. Как известно, лучшим способом ликвидации негативных последствий, в частности, химического загрязнения является предупреждение этого загрязнения. Во всяком случае, по экономическим показателям для этого менее затратным является использование карьерной техники с электродвигателями либо с современными системами двигателей по сравнению с проведением масштабной площадной очистки приблизительно 3 млн м<sup>3</sup> (150 га × 2 м). Невысокие уровни загрязнения прилегающей к Ново-Пятовскому карьеру территории связаны именно с использованием экскаваторов с электродвигателями.

Таким образом, недопущение к работе и замена старой техники на более совершенную, а также применение при разработке карьеров техники на электродвигателях позволяет существенно ограничить загрязнение окружающей среды.

Кроме того, в процессе горно-добычных работ необходимо проведение мониторинговых исследований для контроля динамики загрязнения, а также дальнейшего изучения его площадной зональности [7].



Рис. 14. Заболачивание территории к северу от карьера в районе площадки № 6, вызванное сбросом воды из водоотлива

После завершения добычных работ обязательно проведение горнотехнической рекультивации территории с непременным выполаживанием бортов карьера и использованием отвальных масс для засыпки выработанного пространства. На этом этапе возможно применение различных методов очистки грунтов [8] для полного экологического восстановления участка. При этом в период проведения второго этапа рекультивации наиболее эффективно применение биологических методов очистки [8]. Предпочтительным представляется метод биоочистки грунтов путем внесения в них культур микроорганизмов, поскольку почвенно-растительный слой территорий карьеров бывает фактически уничтоженным. Создание растительного покрова должно производиться с использованием характерных для дан-

Таблица 4

| Содержание ПАУ в воде |                       |                      |       |      |     |      |           |         |      |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------|------|-----|------|-----------|---------|------|
| № площадки            | № пробы               | Содержание ПАУ, нг/л |       |      |     |      |           |         |      |
|                       |                       | B(a)P                | Phen  | Antr | Flt | Pyr  | BaA+Chrys | BbF+BkF | BPL  |
| 5                     | 5B                    | 18,8                 | 150,0 | 9,0  | 8,0 | 55,0 | 37,0      | 25,0    | 16,0 |
| 6                     | 6B                    | 6,1                  | 100,0 | 4,0  | 5,0 | 30,0 | 20,0      | 6,0     | 1,0  |
| ПДК в воде            | для хоз.-быт.использ. | 5,0                  | -     | -    | -   | -    | -         | -       | -    |
|                       | для рыбохоз.использ.  | 1,0                  | -     | -    | -   | -    | -         | -       | -    |

Таблица 5

| Содержание ПАУ в приземном слое воздуха |                          |       |      |     |      |           |         |      |
|-----------------------------------------|--------------------------|-------|------|-----|------|-----------|---------|------|
| № площадки                              | Содержание ПАУ, нг/филтр |       |      |     |      |           |         |      |
|                                         | B(a)P                    | Phen  | Antr | Flt | Pyr  | BaA+Chrys | BbF+BkF | BPL  |
| 1                                       | 1,2                      | 60,0  | 1,2  | 6,0 | 28,0 | 53,0      | 1,0     | 3,0  |
| 3                                       | 3,3                      | 168,0 | 4,0  | 5,0 | 48,0 | 64,0      | 2,0     | 17,0 |
| 4                                       | 2,5                      | 67,0  | 2,0  | 3,0 | 33,0 | 24,0      | 1,0     | 10,0 |
| 6                                       | 4,7                      | 78,0  | 2,0  | 6,0 | 25,0 | 39,0      | 3,0     | 9,0  |

ного района видов растений с учетом состава грунтов. Посадка сосен (как иногда предусматривается проектами) на суглинистых субплодородных грунтах как минимум нецелесообразна.

### Выводы

1. В результате проведенного исследования выявлено наличие загрязнения территории, прилегающей к площади разработки месторождения строительных известняков, полициклическими ароматическими углеводородами и тяжелыми металлами.
2. Основным источником загрязнения среды ТМ и ПАУ при отработке МСМ являются выхлопы от работающего карьерного транспорта. В случае Ново-Пятовского месторождения это бульдозеры, применяемые на вскрышных работах, и автосамосвалы, вывозящие горную массу, а также взрывные работы.
4. Концентрации бенз(а)пирена на всей исследованной площади ниже ПДК. Однако наблюдается значительное превышение фоновых уровней В(а)Р, а также других ПАУ в растениях, почвах и подстилающем грунте на площадках, расположенных с подветренной стороны от карьера.

5. Содержание бенз(а)пирена в воде, сбрасываемой из карьерного водоотлива и затем самотеком попадающей в поверхностные воды, превышает ПДК для воды хозяйственно-бытового использования.

6. Для предупреждения развития рассмотренных в статье негативных тенденций и ликвидации его последствий предложен ряд рекомендаций по технологии отработки МСМ и рекультивации карьеров.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что даже при разработке, казалось бы, «безобидных» карьеров на месторождениях строительных известняков происходит существенное нарушение эколого-геологических условий и загрязнение окружающей среды, включая приземный слой воздуха, растительность, почвы, подпочвенные грунты и водные объекты. ♀

*Авторы выражают благодарность доценту геологического факультета МГУ Е.Н. Самарину за помощь в проведении химических анализов и обсуждение их результатов и ведущему научному сотруднику ГУ «НПО «Тайфун»» А.И. Шилиной за помощь в определении концентраций ПАУ в исследованных образцах.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М., Яковлева Е.В. Критерии оценки загрязнения почв полициклическими ароматическими углеводородами // Экология и промышленность России. 2008. № 11. С. 42–45.
2. География Калужской области. Тула: Приокское книжное издательство, 1975. 128 с.
3. Демография и ресурсы устойчивого развития Калужской области / под науч. ред. В.А. Семенова. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2008. 248 с.
4. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2010 году. Калуга: Правительство Калужской области, Министерство природных ресурсов, экологии и благоустройства Калужской области, 2011. 195 с. URL: <http://admoblkaluga.ru/upload/minecolog/golovatskay/Doklad2010.pdf>.
5. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2009 г.: ежегодник. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. 138 с.
6. Королев В.А. Актуальные эколого-геологические проблемы рационального недропользования в Российской Федерации // Геориск. 2010. № 2. С. 30–36.
7. Королев В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: учебное пособие / под ред. В.Т. Трофимова. М.: КДУ, 2007. 416 с.
8. Королев В.А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 365 с.
9. Красилов В.А. Охрана природы: принципы, проблемы, приоритеты. М.: Изд-во Института охраны природы и заповедного дела, 1992. 174 с.
10. Медведева С.Г., Королев В.А. Воздействие разработки месторождений строительных материалов на окружающую среду (на примере Ново-Пятовского карьера, Калужская область) // Материалы 22-й конференции молодых ученых, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца, «Геология и геоэкология: исследования молодых», Апатиты, 8–10 ноября 2011 г. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. С. 27–30.
11. Медведева С.Г., Королев В.А. О необходимости проведения инженерно-экологических изысканий на предпроектной стадии строительства карьеров // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии «Четырнадцатые Сергеевские чтения» на тему «Роль инженерной геологии и изысканий на предпроектных этапах строительного освоения территорий», секция «Совершенствование нормативной базы инженерных изысканий на предпроектных этапах строительства», Москва, ИГЭ РАН, 22 марта 2012 г. М.: РУДН, 2012. С. 345–349.
12. Медведева С.Г., Королев В.А. Содержание тяжелых металлов и полициклических ароматических углеводородов в системе «растение — почва — подстилающий грунт» на Ново-Пятовском карьере известняков (Калужская область) // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы», Воронеж, 4–6 октября 2011 г. Воронеж: КОМПЕР, Центр документации, 2011. С. 166–168.
13. Медведева С.Г., Королев В.А., Самарин Е.Н. Воздействие разработки месторождений строительных материалов на эколого-геологические условия // Ломоносовские чтения 15–17 ноября 2011 г., посвященные 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова. Секция «Геология». Подсекция «Инженерная и экологическая геология». М.: Изд-во МГУ, 2011. URL: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1186049&uri=medvedeva.html>.
14. Петров В.Г. Геологическое строение и полезные ископаемые Калужской области. Калуга: Эйдос, 2003. 439 с.
15. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология: учебник. М.: ЗАО Геоинформмарк, 2002. 415 с.
16. Тяжелые металлы: биологическая роль, содержание в почвах и растениях. 2010. URL: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2010/feht/farafonova/library/article.html>.

# ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

**Принимаются оригинальные статьи по широкой тематике и основным теоретическим разделам инженерной геологии: грунтоведению, инженерной геодинамике, региональной инженерной геологии, а также статьи по механике грунтов, гидрогеологии и геокриологии, мониторингу геологических и литотехнических систем, технической мелиорации грунтов, методике и методам инженерно-геологических исследований, истории и методологии инженерной геологии.**

- Статьи принимаются в печатном или электронном виде (по электронной почте) объемом до 1 авторского листа (40 тыс. печатных знаков с пробелами или 10–12 страниц текста, набранного на компьютере и напечатанного шрифтом 12-го кегля с одиночным интервалом).
- Статьи сопровождаются аннотациями (до 100–150 слов) на русском и английском языках, а также списком ключевых слов (5–10 слов) также на русском и английском языках.
- Название статьи, фамилия и инициалы автора даются на русском и английском языках.
- Фамилия автора сопровождается должностью, местом его работы и электронным адресом.
- Структура статьи должна по возможности включать введение (цель, задачи работы), методику (методы) исследования, характеристику объекта исследования, результаты и выводы (заключение).
- Статья сопровождается списком цитируемой литературы, оформленным в соответствии с ГОСТ 7.1-2003, составленным по алфавиту (сначала русский, затем иностранный).
- Ссылки на литературу в статье даются по номерам алфавитного списка в квадратных скобках, например, [2], [4–6] и т.п.
- Рисунки (цветные или черно-белые фотографии, штриховые рисунки, диаграммы, графики и т.п.) принимаются в электронном виде в формате jpeg, tiff или eps с разрешением не менее 300 пикселей на дюйм (или 300 dpi). Цветные карты принимаются с разрешением не менее 600 dpi.
- Рисунки сопровождаются подрисовочными подписями и нумерацией.
- Размерность физических величин и параметров дается в системе СИ.
- Таблицы сопровождаются названиями и нумерацией.
- Статьи проходят обязательное внутреннее и внешнее рецензирование, техническую редакцию, после чего автору высылается верстка для окончательной проверки.
- После публикации статьи в журнале автору высылается по e-mail электронная версия опубликованной статьи в формате pdf. После выхода номера в свет автор может бесплатно получить в редакции до трех экземпляров журнала.
- С аспирантов плата за статьи не взимается.

**Адрес редакции:**

**105187, Москва, Окружной проезд, д. 18.**

**Тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2095.**

**E-mail: [geo@pniis.ru](mailto:geo@pniis.ru)**

