



ISSN 0203-0292

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

---

4

1987



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА ·

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

# И Н Ж Е Н Е Р Н А Я Г Е О Л О Г И Я

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1979 ГОДУ

4 • 1987

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

ИЮЛЬ — Август

МОСКВА

## СОДЕРЖАНИЕ

Парабучев И. А., Бахирева Л. В. Итоги V Международного конгресса по инженерной геологии . . . . .	3
Груздов А. В., Трофимов Б. Т. Карты-схемы физико-механических характеристик грунтов осваиваемых территорий крупных городских агломераций . . . . .	21
Тер-Мартиросян З. Г., Демин И. И. Деформирование структурно-неустойчивых грунтов при увлажнении . . . . .	26
Горбацевич Ф. Ф. Проявление нелинейности деформирования крепких кристаллических пород . . . . .	33
Такранов Р. А. Инженерно-геологическое прогнозирование трещиноватости горных пород Иркутского угольного бассейна на основе изучения закономерностей ее формирования . . . . .	46
Маркарьян В. В. Опыт долгосрочного прогноза оползней по критическим деформациям в майкопских глинах Абхазии . . . . .	58
Моностырная Т. А., Гутковский В. Н. Изучение связи оползневых процессов северо-западного Причерноморья с энергетическим балансом рельефа . . . . .	63
Грибанова Л. П., Бабак В. В., Зайцев А. С., Устинова З. Г., Ломов В. Ф. Оценка влияния полигонов складирования твердых бытовых и промышленных отходов на геологическую среду . . . . .	68
Лапицкий С. А., Алексеенко Г. П., Осипов Ю. Б. Этапы исследования при оценке загрязнения почв и грунтов зоны аэрации в районах горнодобывающих предприятий . . . . .	74
Иваненко В. И., Мельников Б. Н., Осипов В. И., Нестеров А. И. К определению физических соотношений при расчетах геотехногенных массивов . . . . .	79
Хрусталев Л. Н., Водолазкин В. М. О достоверности существующих оценок сжимаемости многолетнемерзлых грунтов при оттаивании . . . . .	86
Богданов М. И. Комбинированный логико-формальный подход при инженерно-геологическом районировании для целей мелиоративного строительства . . . . .	91
Толкачев М. Д., Поликарпов А. И., Румянцева Н. А., Ковбаса С. И. Изучение структуры и количественная оценка порового пространства песчаников с применением растровой электронной микроскопии . . . . .	99

## C O N T E N T S

<b>Parabuchev I. A., Bakhireva L. V.</b> A review of the Vth International Congress on Engineering Geology . . . . .	3
<b>Gruzgov A. V., Trofimov B. T.</b> The schematic maps of the physical mechanical characteristics of soils in the development areas of large urban agglomerations . . . . .	21
<b>Ter-Martirosyan Z. G., Demin I. I.</b> The deformation of the structurally unstable soils at moistening . . . . .	26
<b>Gorbatshevich F. F.</b> The development of non-linear deformation in hard crystalline rocks . . . . .	33
<b>Takranov R. A.</b> The engineering geological prediction of rock fissuring in the Irkutsk coal basin based on the study of its development regularities . . . . .	46
<b>Markaryan V. V.</b> Experience in the long-term prediction of landslides by the critical deformations in Maykop clays of Abkhazia . . . . .	58
<b>Monostyrskaya T. A., Gutkovsky V. N.</b> A study of the relation between the landslide processes in the north-western Black-sea area and the energetic balance of relief . . . . .	63
<b>Gribanova L. P., Babak V. V., Zaytsev A. S., Ustinova Z. G., Lomov V. F.</b> The estimate of the impact of hard waste storage fields on the geological environment . . . . .	68
<b>Lapitsky S. A., Alekseenko G. P., Osipov Yu. B.</b> The research stages in the soils estimate of the aeration zone in mining works areas . . . . .	74
<b>Ivanenko V. I., Melnikov B. N., Osipov V. I., Nesterov A. I.</b> The determination of physical relations in the geotechnical masses calculations . . . . .	79
<b>Khrustalev L. N., Vodolazkin V. M.</b> On the reliability of the existing estimates of permafrost soils compressibility at thawing . . . . .	86
<b>Bogdanov M. I.</b> The combined logical-formal approach to the engineering geological zonation for land-reclamation construction . . . . .	91
<b>Tolkachev M. D., Polikarpov A. I., Rumyantseva N. A., Kovbasa S. I.</b> A study of structure and a quantitative estimate of the sandstone pore space with the use of the scanning electron microscopy . . . . .	99

УДК 624.131

ПАРАБУЧЕВ И. А., БАХИРЕВА Л. В.

## ИТОГИ V МЕЖДУНАРОДНОГО КОНГРЕССА ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

С 20 по 25 октября 1986 г. в Буэнос-Айресе, в Культурном центре им. Х. Сан-Мартина, проходил V Международный конгресс по инженерной геологии. В его работе приняли участие около 440 специалистов из 32 стран. Заседания конгресса открылись вступительной речью президента Международной ассоциации инженер-геологов (МАИГ) проф. М. Лангера, затем с приветствием выступили президент Национальной ассоциации инженер-геологов Аргентины В. Маурино и председатель Оргкомитета Г. Римолди. Программа конгресса включала научные сессии, а также заседания Совета и Генеральной ассамблеи МАИГ, на которых состоялись выборы нового состава Исполнительного комитета, президента и генерального секретаря МАИГ, были решены организационные вопросы, связанные с дальнейшей деятельностью МАИГ.

Научные заседания проходили в течение четырех дней по шести основным темам: 1) «Инженерно-геологические исследования массивов скальных грунтов при гражданском и шахтном строительстве»; 2) «Инженерно-геологические проблемы, связанные с устройством фундаментов и проходкой горных выработок в слабых скальных грунтах»; 3) «Инженерно-геологические аспекты строительства на дисперсных грунтах»; 4) «Инженерно-геологические проблемы, связанные с гидротехническим и гидроэнергетическим строительством»; 5) «Инженерная геология при строительстве автомобильных и железных дорог, береговых и морских сооружений»; 6) «Инженерно-геологические аспекты охраны геологической среды при освоении новых и урбанизированных территорий».

Кроме того, на конгрессе работало два коллоквиума: «Инженерная геология и проекты строительства геотермальных объектов», «Инженерно-геологические проблемы захоронения ядерных отходов».

По каждой теме конгресса и коллоквиумам заслушивались генеральные доклады и 2—3 заказных, затем краткие сообщения по обсуждаемой тематике. В заключение заседания была проведена дискуссия и подведены итоги обсуждения проблемы.

Все доклады, поступившие по тематике научных сессий, были изданы к началу конгресса в шести томах «Трудов конгресса». Готовится к печати седьмой том, в который войдут генеральные и заказные доклады, а также итоги дискуссии. Большая часть докладов, поступивших по тематике, опубликована в «Бюллетене МАИГ» № 34.

Всего на конгресс поступило 263 доклада из 32 стран. Наибольшее их число (59) представили ученые КНР. Советские специалисты подготовили к конгрессу 24 доклада, из которых было оглашено 6. С докладами выступили В. П. Анальев, В. П. Бочкирев, Ю. Ф. Захаров, В. И. Осипов, И. А. Парабучев, В. Т. Трофимов. Кроме того, два члена советской делегации сделали заказные доклады. Доклады советских ученых вызвали большой интерес, поскольку касались малоизученных проблем, имеющих теоретическое и практическое значение.

## **Тема 1. Инженерно-геологические исследования скальных грунтов при гражданском и шахтном строительстве**

По теме было представлено 48 докладов: 15 из КНР, 7 из СССР, 4 из Португалии, по 3 из Индии, ПНР, Испании, по 2 из Аргентины, Японии, Канады, ЧССР, по 1 из Франции, ФРГ, Сингапура, Италии, Болгарии. Генеральный доклад сделал проф. Р. Оливейра (Португалия), заказные — Ванг Сиджинг (КНР) и Д. Мюллер (Португалия).

В рамках указанной темы обсуждались следующие вопросы: геологические и геофизические исследования массивов скальных грунтов; корреляция получаемых данных (13 докладов); геотехнические классификации: практические применения (10); поверхностные и подземные выработки больших размеров: проблемы связанные с напряжениями (7); исследования и техника для ведения опытных работ при строительстве туннелей (10); мониторинг скальных грунтов: новая техника и результаты (8).

В генеральном докладе Р. Оливейра отметил наиболее важные вопросы обсуждаемой проблемы, дал краткий обзор поступивших докладов и их систематизацию. В заказном докладе Ванг Сиджинга рассматривались геологические и геофизические исследования скальных грунтов, в докладе Д. Мюллера — разработка механической модели для калийных солей.

Среди докладов, посвященных геологическим и геофизическим исследованиям скальных грунтов, представляет интерес сообщение французских специалистов (О. Этьен и др.), изучавших трещиноватость скальных массивов на наблюдательном участке с применением комплекса геологических и геофизических методов. Такие работы рекомендуется проводить в заброшенных карьерах, трещиноватость пород которых может быть как первичной, так и образованной при вскрытии карьера.

В докладе Д. А. Матера и др. (Аргентина) содержался инженерно-геологический анализ строительной площадки, расположенной между двумя крупными разрывами. Анализ был сделан путем оценки частоты трещиноватости пород, выявленной геостатистическими методами.

Вызвала интерес предложенная И. Пенинской (ПНР) методика лабораторного изучения физико-механических свойств скальных пород без нарушения их структуры. Для этого использовался метод генерирования поверхностных волн и измерения их скорости.

Л. Високинский (ПНР) рассмотрел явления сейсмической активности, вызванные горными разработками в карьере глубиной до 200 м. Он провел анализ механизма явления и дал прогнозные оценки землетрясений, рассчитанные по упрощенному методу сейсмической опасности.

В докладах о геотехнических классификациях подчеркивалась необходимость инженерно-геологической классификации скальных грунтов при любых видах строительства. Принципы таких классификаций могут быть различными. Ху Бинг и Ли Юруи (КНР) предложили классификацию скальных пород по их свойствам и предъявляемым к ним требованиям. Естественные характеристики скальных пород определяются тремя факторами: типом пород, структурой скальных массивов и окружающей средой скального массива.

Принципы инженерно-геологического подразделения скальных грунтов применительно к шахтному строительству рассмотрели Хи Бинг и Ли Юри (КНР). Предполагаемая классификация основывается на выделении типов грунтов, структуры их массивов и состояний.

Интересные данные в методическом и практическом плане содержались в докладах, освещавших результаты поверхностных и подземных разработок скальных грунтов, включая проходку туннелей. Ванг Сиджинг и Дин Эмбао (КНР) собрали ценный материал о сдвигах горных пород в 10 рудниках Китая, принесших большие экономические потери.

По мнению докладчиков, эти сдвиги контролируются инженерно-геологической структурой скальных массивов, особое значение при этом имеет «клиновидное» залегание блоков массивов, предопределяющее развитие сдвиговых процессов в подземных выработках.

В докладе Денг Йимина и Ли Шентао (КНР) были приведены интересные сведения о строительстве по австрийскому методу в горно-складчатой области туннеля длиной более 14 км. Заслуживают внимания степень инженерно-геологической изученности разреза и принятное проектное решение о применении облегченной проходки туннеля.

Г. Ягуа (Испания) рассмотрел результаты разведки под гидротехнический туннель Талаве длиной 31,9 км и сечением 5,2 м<sup>2</sup>, который проходит в морских миоценовых, меловых, юрских и триасовых складчатых образованиях. Сложности в строительстве туннеля связаны с разломом «Гlorия». Здесь юрские известняки и доломиты надвинуты на меловые песчаники, и вся область пересекается системой более поздних субвертикальных разломов. Для проходки этой зоны, сопровождавшейся аварийными ситуациями, потребовалось 4 года и 40 млн. долл.

Обсуждались также методы и технические средства мониторинга скальных грунтов. В докладе Е. Аврамовой-Тачевой и Б. Костака (НРБ) приведены результаты наблюдений с помощью дилатометров на трех сейсмически активных участках Болгарии. Выбранные участки соответствовали пересечению двух главных тектонических разломов, где было зарегистрировано самое большое неотектоническое поднятие. При сравнительно кратковременном наблюдении обнаружено смещение крыльев разрывов на 12 мм.

В докладе Г. А. Голодковской и др. (СССР) было отмечено, что напряженное состояние скальных грунтов обусловлено действием гравитационных, тектонических, гидродинамических, геотермальных и кристаллизационных сил. Для оценки этих сил рекомендуется несколько методов: измерения напряжений в подземных выработках и скважинах, специальные геофизические исследования, определение напряжений с помощью акустической эмиссии и математического моделирования. Перспектива такого комплексного подхода показана на примере Восточной Сибири.

В докладе М. Маугери, Э. Мотта (Италия) и С. Ванга (КНР) подчеркивалось, что геотехнические свойства трещин в скале — самые важные параметры в анализе устойчивости и инженерных расчетах. Лабораторные и полевые испытания дают лишь часть информации о малой области оползающей поверхности. Одним из перспективных подходов к изучению этих проблем и получению обширной информации может служить параметрический обратный анализ скальных оползней. Результаты такого анализа, проведенные для одного оползня, могут оказаться полезными для всего региона при сходных геологических условиях. Параметрический обратный анализ применялся к трещиноватым карбонатным породам, к которым приурочены многочисленные оползни, произошедшие во время землетрясения в Фриули в Италии в 1976 г. Согласно результатам анализа, угол внутреннего трения по трещинам, определенный расчетным способом, сравним с данными опытных испытаний пород. Вместе с тем рассчитанные величины сцепления намного меньше тех, что получаются при механических испытаниях.

В целом доклады по теме 1 не содержат принципиально новых направлений в изучении скальных грунтов, которые бы не были известны в нашей стране. Вместе с тем многие из них включают оригинальные данные, полученные при комплексном исследовании массивов скальных грунтов, обобщают опыт ведения таких исследований. Особый интерес для советских инженер-геологов представляют работы в области туннельного строительства, выполняемые в Испании, Канаде, Португалии.

## **Тема 2. Инженерно-геологические проблемы, связанные с устройством фундаментов и проходкой горных выработок в слабых скальных грунтах**

По этой теме было представлено 27 докладов: 8 из КНР, 5 из Аргентины, 3 из СССР, по 2 из Франции и США, по 1 из Бразилии, Гонконга, Италии, Нигерии, Португалии, ФРГ и Швеции. Генеральный доклад сделал Д. И. Дир (США), заказной — О. Варде (Аргентина).

Представленные на конгресс доклады подразделялись на шесть групп: геологические и геофизические исследования слабых горных пород, характеристики и классификация (9 докладов); слабые горные породы как основания, их цементация и дренаж (5); подземные горные выработки (3); поведение и укрепление слабых структурных зон (2); динамика и тектоника слабых горных пород (2); карстовые явления (6).

В генеральном докладе Д. Дири были рассмотрены инженерно-геологические особенности основных типов слабых горных пород, к которым отнесены в разной степени выветрелые скальные нерастворимые и скальные растворимые грунты, все полускальные разности, а также измененные грунты, залегающие в тектонически ослабленных зонах (зоны разрывов и сдвигов в массивах, зоны рассланцованных пород и т. п.). Подробно анализировались строение и свойства горных пород в таких зонах, а также особенности массивов карбонатных и сульфатных пород, в которых имеются карстовые полости.

Во многих докладах содержались интересные данные об инженерно-геологических особенностях и методике исследования слабых песчаников, туфов, выветрелых изверженных пород на различных континентах. С методической точки зрения интерес представляет доклад Л. Доберайнера и Р. Оливейры (Португалия), в котором обсуждались вопросы лабораторного и полевого изучения слабосцепментированных песчаников, а также сообщение Ф. П. Мартина (Гонконг) об использовании параметрических определений для оценки выветрелых пород. Инженерно-геологическая классификация измененных пород в зонах разрыва приведена в докладе Чанг Хиангонга и др. (КНР).

Серия докладов была посвящена использованию методов технической мелиорации для улучшения свойств слабых скальных грунтов разного состава в основании гидroteхнических сооружений,озведенных в Аргентине (доклады К. Андерсона и О. Варде, Л. Сиегриста и Л. Товно и др.) и Бразилии (доклад Г. Сигиеры и др.).

Особенности строительства на гидроэнергетическом комплексе Рио-Гранде I деривационного туннеля длиной 5,5 км и сечением 206 м<sup>2</sup> освещены в докладе И. Дель Рио и др. (Аргентина). Туннель пройден в докембрийских сланцах, содержащих выветрелые катаклазированные разности и глинистые брекчии. Влияние высокой пористости известняков на устойчивость подземной выемки проанализировано в докладе А. Дениса и др. (Франция).

Доклады, в которых рассматривались поведение слабых структурных зон, динамика и тектоника слабых пород, носят частный характер, поэтому на них мы останавливаться не будем.

Разнообразно содержание докладов о проблемах карста. Модель развития карста и распределение карстовых форм в глубоких горизонтах массивов рассмотрели Чен Гиолианг и Тан Зходи (КНР). Вопросы оценки устойчивости закарстованных массивов изложил в своем докладе В. М. Кутепов (СССР), методику изучения карстовых отложений — И. А. Печоркин (СССР). Механизм формирования карстовых провалов вблизи шахтных полей и пути предотвращения таких провальных явлений обсуждались в докладе Ху Вейгоу и Зхао Гуиронга (КНР).

В целом доклады по теме 2 не содержат информации о принципиально новых теоретических и методических положениях. Однако в них мо-

тут найти интересные фактические данные и полезные методические приемы инженер-геологи, работающие в системе Гидропроекта и Гидроспецпроекта Минэнерго СССР, в организациях Госстроя СССР.

### Тема 3. Инженерно-геологические аспекты строительства на дисперсных грунтах

По теме было представлено 48 докладов: 18 из КНР, 5 из ПНР, по 4 из Бразилии и СССР, 3 из Испании, по 2 из Аргентины, Саудовской Аравии, Франции, по 1 из Италии, Канады, Малайзии, Нигерии, ФРГ, Чили, Эфиопии, Югославии. С генеральным докладом выступил проф. Д. Салаз (Испания), с заказными — проф. Е. Нунез (Аргентина) и проф. В. И. Осипов (СССР).

Основными проблемами, обсуждаемыми по этой теме, были просадочность и набухаемость грунтов (19 докладов); латеритовые и элювиальные грунты (7); разжижение грунтов и динамические проблемы (5); закрепление грунтов (3); связные органические и засоленные грунты (12).

В генеральном докладе Д. Салаза было освещено современное состояние исследований по проблеме, даны краткий обзор поступивших докладов и их систематизация. В заказном докладе Е. Нунеза излагались инженерно-геологические условия строительства на дисперсных грунтах района Пампии (Бразилия), обладающих большой неоднородностью, слабой устойчивостью к выветриванию и размыванию, что создает много трудностей с ведением гидротехнического строительства в этом районе. В докладе В. И. Осипова были рассмотрены природа и факторы, обусловливающие разжижение (тиксотропию) глинистых грунтов, а также динамическую устойчивость чистых и пылеватых (плывунных) песков, показано принципиальное различие в природе разжижения различных типов дисперсных грунтов под влиянием динамических воздействий.

Просадочные и набухающие грунты распространены практически на всех континентах, и одной из важнейших задач, возникающих при строительстве на этих грунтах, является прогноз изменения их свойств под влиянием различных техногенных воздействий. Для прогноза поведения лессов В. П. Ананьев и Н. В. Воляник (СССР) предложили оценивать потенциальную энергию просадочности лесовой толщи и осуществлять застройку с учетом этого показателя. При строительстве на набухающих грунтах, по мнению итальянских ученых П. Канути, Г. Родолфи и М. Шиепота, необходимы проведение крупномасштабного картирования территории и составление карты потенциальной набухаемости грунтов. Д. Тисота, М. Абаушока и И. Сиссе (Франция) предлагают оценивать набухаемость глин не в одометрах, а в приборах трехосного сжатия, что позволяет точнее прогнозировать набухание, учитывая при этом напряженное состояние глин в условиях их естественного залегания. В докладе А. А. Мусаэляна и др. (СССР) рассматривались новые конструкции фундаментов, предназначенных для строительства сооружений на водонасыщенных лессах с учетом динамической устойчивости последних.

Большое внимание участников конгресса привлекли доклады, посвященные природе и механизму просадочности и набухаемости грунтов, а также генезису просадочности лессов. В докладе В. И. Осипова и В. Г. Бабака (СССР) рассмотрен механизм набухания глин, в основе которого лежат процессы гидратации глинистых частиц и их постепенного шарнирного разворота, что является следствием баланса сил притяжения и отталкивания между частицами. Е. Мыслинская (ПНР) изучала изменения микростроения лесовых грунтов при замачивании, приводящие к их просадке. Это явление она объяснила снижением

структурных связей в лессах за счет разрушения глинистых агрегатов и растворения солей на контактах частиц. Формированию прочности элювиальных грунтов был посвящен доклад Гао Гуори (КНР). Он проанализировал микроструктурные особенности этих грунтов и показал роль остаточного кристаллизационного сцепления и вновь образующихся цементационных связей в формировании структурной прочности. Среди работ по генезису просадочности лессов следует выделить доклад Ф. Шу (КНР). Докладчик придерживается полигенетической точки зрения относительно накопления пылеватого материала. По его мнению, высокая пористость у таких осадков формируется под влиянием эпигенетических процессов, связанных прежде всего с климатическими факторами.

В последние годы значительно возрос интерес к динамическим свойствам грунтов, что вызвано процессами подтопления территорий и снижением динамической устойчивости грунтов, освоением северных и экваториальных районов Земли с избыточным увлажнением, а также строительством береговых сооружений и платформ в открытом море. Закономерности поведения глинистых грунтов при вибрационных воздействиях различной частоты и амплитуды рассмотрены в работе Е. А. Вознесенского, В. Я. Калачева и В. Т. Трофимова (СССР).

С. Занг (КНР) разработал полевой метод оценки сейсмической устойчивости песков на основе динамического зондирования. Он предложил принципиальную схему выполнения работ и расчетную формулу, учитывающую помимо показателей условного динамического сопротивления зондированию генезис и особенности залегания песков, их мощность, уровень подземных вод, гранулометрический состав и относительную плотность песков.

В ряде докладов обсуждались инженерно-геологические особенности латеритовых и остаточных грунтов в экваториальной зоне Америки, Африки и Азии (доклады Р. Диаз и В. Гелинг, Бразилия; Лин Зонгуан, Гао Гуори, КНР; С. Маломо, Нигерия). Изучаются условия образования этих грунтов, их состав, строение и свойства, поведение под фундаментами инженерных сооружений.

Упомянем о нескольких докладах, касавшихся инженерно-геологического изучения органических и засоленных грунтов. Структура и физико-механические свойства торфов рассмотрены в докладе С. Рубичи (ПНР), геотехнические свойства засоленных грунтов — в докладе Фу Шифа (КНР). Математическую модель, основанную на применении статистического подхода при изучении процесса выщелачивания, предложил М. Влахович (Югославия). Оценка влияния выщелачивания солей на свойства четвертичных озерных глин дана в докладе Д. Конга (КНР). Некоторые особенности поведения слабых органических грунтов в основании инженерных сооружений анализируются в докладах Лиа Вейбина (КНР) и Ф. Романа (Испания).

Анализ представленных на секции докладов свидетельствует о том, что проводимые в нашей стране исследования в области инженерно-геологического изучения дисперсных грунтов соответствуют международному уровню. В ряде вопросов, таких, например, как изучение природы просадочности лессов и набухания глин, уровень советских исследований опережает мировой. Вместе с тем существуют направления, где мы заметно отстаем. Это относится прежде всего к комплексной оценке динамической устойчивости грунтов в сейсмически опасных районах, основанной на применении динамического зондирования.·

Следует отметить, что при изучении дисперсных грунтов все большее влияние приобретает генетический подход, разработанный советской школой инженер-геологов. В ряде докладов генетический принцип предлагается в качестве основного критерия классификации грунтов в инженерно-геологических целях. Так, в докладе Фан Зонгхуа и Ли Шангин (КНР) на основании анализа 36 873 образцов показана несостоятель-

ность построения классификации глинистых грунтов по числу пластичности. Докладчики считают классификатором первого класса генезис грунтов и предлагают на этой основе создать международную классификацию грунтов.

#### **Тема 4. Инженерно-геологические проблемы, связанные с гидротехническим и гидроэнергетическим строительством**

По теме было представлено 49 докладов: 12 из КНР, 9 из Аргентины, 8 из Бразилии, 6 из СССР, по 3 из Испании и Франции, по 1 из Англии, Японии, Новой Зеландии, ПНР, Португалии, ФРГ, ЧССР и США. Генеральный доклад сделал проф. В. де Мелло (Бразилия), заказные — И. А. Парабучев (СССР) и Б. Закалик (Аргентина).

В рамках темы было рассмотрено пять проблем: геоморфологические, геологические и структурные условия выбора створа проектируемых сооружений (22 доклада); проблема оползней и утечек из искусственных водохранилищ (9); методы исследований при решении сейсмотектонических проблем (9); сооружение плотин в долинах равнинных рек (2); строительные материалы: грунты и скальные породы (7).

Заказной доклад И. А. Парабучева был посвящен особенностям инженерно-геологических изысканий при проектировании и строительстве плотин на равнинных реках, доклад Б. Закалика — геоморфологическим, геологическим и структурным условиям выбора створа проектируемых сооружений.

Важное место в гидротехническом строительстве занимает проблема оползней, возникающих при создании водохранилищ. Р. Шустер и Ж. Коста (США) исследовали 135 случаев развития оползней, так или иначе связанных с гидротехническим строительством, проанализировали причины их возникновения и последствия, привели данные о выполнявшихся защитных мероприятиях и их эффективности. Этот доклад, несомненно, представляет большой интерес для советских специалистов, занимающихся проблемами оползней.

Другое крупное обобщение результатов исследования оползней содержалось в докладе А. С. Хасанова и Р. А. Ниязова (СССР) «Оползни на берегах горных водохранилищ в Средней Азии и проблема их прогнозирования во времени». Кроме анализа причин и последствий развития оползней на горных водохранилищах докладчики привели рекомендации по прогнозированию оползневых явлений, имеющие большое практическое значение.

Отметим также интересное сообщение М. Кутюрье (Франция) «Проблемы устойчивости откосов и чаши водохранилища, созданного в холмистой местности», А. Гарсия Ягуе и М. Фернандеса (Испания) «Нестойчивость откосов и выбор створа плотины для водохранилища Пас», Чжан Чжоянь, Ли Юйую, Лю Ханьчоа и др. (КНР) «Характерный пример оползня, вызванного поровым давлением. Механизм и анализ устойчивости оползня Цзипази на водохранилище гидроузла Янцзы Горж».

Вопросы фильтрационных потерь из водохранилища рассмотрели Г. Гудчик и С. Ньюбле (Бразилия). В своем докладе «Гидравлические модели для исследования фильтрации через основание гидротехнических сооружений» они предложили достаточно простой и надежный (как они считают) метод построения фильтрационных моделей, получивший название метода пересекающихся узлов, который позволяет использовать при моделировании непосредственно результаты опытно-фильтрационных работ.

К сожалению, в подавляющем большинстве докладов, посвященных различным аспектам оценки сейсмической опасности для гидротехнических сооружений, не затрагивались вопросы «изведенной» сейсмичности, сейсмотектоники и др. Лишь в 2 докладах: Г. Ханкокса, С. Бенланда и

И. Брауна (Новая Зеландия) «Оценка сейсмотектонической опасности для гидроузла на р. Кавару в Новой Зеландии» и Ж. Перруки, М. Матара де Саркиса и Г. Таббия (Аргентина) «Телеметрия в решении сейсмотектонических проблем» — рассматривается методика прогноза характера и степени сейсмических воздействий на сооружение. Довольно интересные данные по моделированию неотектонических и сейсмотектонических процессов приведены в работе Вань Шицепа, Ли Юшене и др. (КНР) «Методы исследования сейсмотектонических проблем для гидроузла Лонян Горж». Заслуживают внимания результаты исследований высоких естественных напряжений, содержащиеся в докладе Гу Вейюана и Ки Циаоюна (КНР) «Об устойчивости гидротехнических сооружений в районах высоких напряжений земной коры».

Что касается проблемы строительных материалов, то на конгрессе рассматривалось использование связных и дисперсных грунтов в качестве строительного материала для тела плотин неоднородного профиля или водонепроницаемого ядра и скальных пород в качестве упорных призм каменнонабросных плотин или перемычек. Выделяется своей новизной и практической ценностью сообщение Ф. Бянь (КНР) «Характеристика латеритовых грунтов, используемых для отсыпки земляной плотины». В нем подробно излагаются способы и методы применения в качестве строительного материала для гидротехнических сооружений латеритов, характеризующихся, как известно, рядом специфических особенностей. Докладчик дал практические рекомендации по выбору критериев пригодности различных латеритных грунтов для этих целей. В докладе В. Пинто, Д. Родригеса и Дас Навесу (Португалия) «Некоторые достижения в определении характеристик базальтов и известняков, используемых в строительстве каменнонабросных сооружений» для массового определения физико-механических свойств материала предлагаются дешевые и простые испытания на сопротивление дроблению сухих и водонасыщенных образцов базальтов и известняков размером до 5 см, имеющих неправильную форму.

### **Тема 5. Инженерная геология при строительстве автомобильных и железных дорог, береговых и морских сооружений**

По теме поступило 30 докладов: 7 из Бразилии, по 4 из Франции и КНР, по 2 из Аргентины и Нидерландов, по 1 из НРБ, Греции, Испании, Италии, Индии, СССР, США, Таиланда, Финляндии, Югославии, Японии. Генерального и заказных докладов по этой теме не было.

Обсуждение шло по пяти основным направлениям: геологические и геофизические исследования при выборе трасс дорог (4 доклада); основания viadуков, подпорных стенок, мостов и трубопроводов (7); эрозия и аккумуляция в гаванях: дноуглубительные работы и гидравлический намыв (5); строительные материалы: дисперсионные и скальные грунты (13); устойчивость земляных масс (1).

Инженерно-геологические исследования при выборе трасс автомобильных и железных дорог включают геологические, геофизические, буровые и другие работы, в том числе прогноз устойчивости склонов и составление прогнозной карты изменения геологической среды. Результаты таких исследований содержатся в докладах Д. Чхеидзе и О. Куцнашвили (СССР) — проведение изысканий под туннели строящейся транскавказской автодороги; Е. Малагнино (Аргентина) — проведение изысканий при сооружении автодороги № 237 в долине р. Лимай; Г. Рантуччи (Таиланд) — проведение изысканий при строительстве автодороги Шираз-Боушир в Иране.

Серия докладов была посвящена инженерно-геологическим проблемам в связи со строительством viadуков, подпорных стенок, мостов и трубопроводов. В методическом отношении наибольший интерес пред-

ставляет доклад Лин Зуобина (КНР), в котором рассматривается комплекс геофизических работ, выполненный в северной части континентального шельфа Южно-Китайского моря в связи с разведкой нефтяных и газовых месторождений, а также сообщение М. Пуула (Аргентина) об инженерно-геологических исследованиях по трассе газопровода Центрально-Оесте протяженностью около 2000 км. В докладе Ю. Ивао (Япония) описывается информационная система для района Сага Плайн площадью 200 км<sup>2</sup>, созданная на базе персонального компьютера. Система позволяет оперативно находить имеющиеся данные по инженерно-геологическим изысканиям для любого локального участка или его окрестностей, получать данные о геологическом строении на определенной глубине и строить инженерно-геологические профили, быстро составлять инженерно-геологические карты и т. д.

В докладах о проблемах эрозии и осадконакопления в гаванях уделено внимание методике и оборудованию для инженерно-геологических исследований при проведении дноуглубительных работ в портах Саудовской Аравии (доклад С. Константинидиса, Греция), строительству специальных гидротехнических сооружений для перераспределения твердого стока в гаванях и зонах отдыха (доклад А. Гровела, Франция), природным факторам, определяющим эволюцию береговых линий (доклады Б. Чаттерье, Индия; В. Чапаприа и Д. Гонзалеса, Испания).

Наибольшее число докладов было посвящено изучению дисперсных и скальных грунтов как строительных материалов. Ряд докладов (Г. Баризоне, Г. Боттино и М. Карди, Италия; М. Канха и др., Бразилия) содержит описание методики поиска и разведки различных природных строительных материалов, применяющихся главным образом при возведении насыпей и в качестве добавок к цементу при получении бетонов. Рассматриваются методы оценки свойств природных строительных материалов. Так, С. Лебае и др. (Франция) исследовали 15 различных типов скальных грунтов (песчаники, известняки, граниты, гнейсы, амфиболиты и др.) и дали оценку энергии дробления их до определенной дисперсности при использовании четырех различных способов дробления. Полученные данные позволили установить корреляцию между петрографическим составом, механическими свойствами и энергией дробления исследуемых материалов. Приведены примеры использования сапроплитов (доклад Е. Пасторе, Бразилия), латеритовых конкреций (доклад С. Нето и Ф. Дантаса, Бразилия), базальтов (доклад С. Кортельерри, Аргентина), золоуносов (доклад К. Тодорова и Д. Евстафьева, НРБ) в качестве строительных материалов при прокладке автодорог.

Доклады по теме 5 чрезвычайно разнообразны и содержат интересные фактические данные и методические приемы, которые могут быть полезны для инженер-геологов, работающих в системе Госстроя, Минтрансстроя, Мингазпрома и Миннефтепрома. Следует также обратить внимание на широкое участие зарубежных инженер-геологов в поиске, разведке и оценке свойств различных дисперсных и скальных грунтов как строительных материалов. Эти работы являются обязательными при проведении комплексной инженерно-геологической разведки территорий и включают ряд специальных исследований.

## Тема 6. Инженерно-геологические аспекты охраны геологической среды при освоении новых и урбанизированных территорий

По данной теме было представлено 50 докладов: 12 из КНР, 6 из Бразилии, по 5 из СССР и Югославии, по 3 из Испании и Италии, по 2 из Аргентины, НРБ, ПНР, США, по 1 из Бельгии, Гонконга, Нигерии, Нидерландов, Португалии, ЧССР. С генеральным докладом выступил проф. Е. Чиоси (Бразилия), с заказными — проф. А. Шэдмон (Израиль) и С. Бокман (Аргентина).

Обсуждались следующие проблемы: составление геотехнических карт (15 докладов); банк данных по буровым скважинам (1), выемки горных пород на городских территориях (1); освоение подземного пространства (1); проблемы, связанные с интенсивной эксплуатацией подземных вод (4); строительные материалы (1), охрана окружающей среды (8); проблемы, связанные с устойчивостью горных пород (11); инженерно-геологические процессы (7).

Генеральный доклад Е. Чиоси был посвящен инженерно-геологическим аспектам при планировании освоения новых и использовании урбанизированных территорий, заказной доклад А. Шэдмона — строительным материалам, С. Бокмана — влиянию горных выработок на окружающую среду.

Многие проблемы в развитии бразильских городов являются следствием недостаточного изучения геологической среды. В докладе Ж. Баррессо и др. (Бразилия) «Геолого-геотехническое картирование района Рио-де-Жанейро» подчеркнута необходимость комплексного изучения геологической среды, результатом которого будет геолого-геотехническая карта, содержащая информацию о геологической среде и инженерно-хозяйственных объектах. В связи со сложными проблемами планирования и освоения городских территорий бразильские специалисты предлагают проводить исследования геологической среды силами не только геологов, но и географов, архитекторов, агрономов, экономистов.

Большой интерес вызвал доклад Г. Боттино (Италия) «Компьютерная полуколичественная модель „риска“, составленная на основе учета инженерно-геологических особенностей и структуры подземного пространства». Индустриальное и городское строительство в Турине в течение последних 50 лет привело к изменению свойств грунтов, уровня грунтовых и подземных вод, рельефа, активизации инженерно-геологических процессов, ухудшению технического состояния инженерных сооружений. Докладчик подчеркнул необходимость оценки инженерно-геологических параметров и техногенного воздействия, чтобы предотвратить отрицательные последствия.

И. Мулдер (Нидерланды) остановился на детальном инженерно-геологическом картировании городских территорий в масштабе 1 : 5000 и инженерно-геологическом картировании в масштабах 1 : 50 000—1 : 250 000. За последние 10 лет в Нидерландах приобрела особую актуальность проблема охраны геологической среды. Выявляются районы загрязнения,дается прогноз последствий загрязнения, разрабатываются меры защиты от загрязнения, ведутся исследования, связанные с захоронением радиоактивных отходов в соляных куполах и захоронением химических отходов нефти и газа, исследуются хвостохранилища, возможности использования глубоких водоносных горизонтов для временного хранения сжатого воздуха и естественного газа, проблема защиты от загрязнения питьевой воды.

К. Стамс и И. Гансен (Гонконг) рассмотрели вопросы производства и использования «Геотекс»-карт с целью выявления областей, пригодных для геотехнического развития. С помощью компьютера построена «Геотекс»-карта территории Гонконга, которая представляет геотехническую информацию в пределах квадратов площадью 2 га.

Л. Паланкар и Г. Ягуа (Испания) проанализировали возможность использования банка данных системы «Гео-Мадрид» для составления геотехнической карты Мадрида в масштабе 1 : 10 000. В настоящее время в банке данных содержится информация о 6 тыс. скважин, пробуренных на территории Мадрида.

В последнее время в Белграде, как и в большинстве крупных городов мира, усилилась ориентация на подземное строительство. В связи с этим П. Локин и др. (Югославия) обращают особое внимание на необходимость тщательного изучения инженерно-геологических условий,

которые часто лимитируют проведение подземного строительства. Докладчики обсудили проблемы, связанные со строительством в мергелистых толщах, которые в значительной степени подвержены процессам выветривания. Чтобы предотвратить деформацию мергелистых грунтов, рекомендуется использовать специальную технику для быстрой выемки грунтов в полном объеме. Подчеркнута целесообразность постепенной проходки с применением бетонных туннельных экранов по секциям после предварительного улучшения свойств грунтов.

Проблемам оседания земной поверхности в результате просадочности лессовых грунтов был посвящен доклад Жу-Мурен и Жанг-Джаоминг (КНР). Интенсивная инженерно-хозяйственная деятельность часто служит причиной подъема уровня грунтовых вод. При наличии лессовых грунтов это вызывает оседание земной поверхности. Докладчики на примере древнего города Ксиану рассмотрели проблемы, связанные с оседанием земной поверхности, и предложили один из методов охраны геологической среды города — сооружение искусственных водоемов и каналов для контроля за уровнем грунтовых вод.

В докладе Г. Бригенти, Е. Месини (Италия) были проанализированы вопросы эксплуатации подземных вод и газа и возникающее при этом оседание земной поверхности. При добыче газа в долине р. По произошло оседание земной поверхности (местами до 2 м) на площади 2,5 тыс. км<sup>2</sup>. Причиной оседания явилась откачка соленых вод, содержащих газ в растворе на глубине 100—600 м. В районе Равенны отмечено оседание земной поверхности более чем на 1 м. Оседание связано с эксплуатацией подземных вод, в результате чего пьезометрический уровень упал на 40 м. Добыча газа также способствовала оседанию поверхности в этом районе.

В докладе Х. Хайтау и др. (КНР) изложена концепция «островов безопасности», которая используется в теории геомеханики при исследовании стабильности территории. Докладчики привели примеры выбора на основе этой концепции строительных площадок для атомных электростанций в провинциях Гуадонг и Ляонинг. Метод «островов безопасности» был применен впервые проф. Ли Сигуаном как общее описание стабильности массива пород.

Несколько докладов было посвящено проблемам сейсмостойкого строительства. А. Танака и др. (Япония) отметили необходимость совершенствовать исследования по микросейсмическому районированию для целей сейсмобезопасности городских территорий. Чтобы обеспечить оптимальное функционирование системы «здание — фундамент — грунт», необходимо при строительстве учитывать фактор сейсмичности. Докладчики выполнили микросейсмические исследования по методу доктора Канае на территории г. Кумамоту и проанализировали полученные результаты. С помощью компьютеров построена серия геологических карт Кумамоту.

Ряд докладов по рассматриваемой проблеме представили советские ученые. С. А. Акинфиев, В. В. Баулин и Е. С. Дзекцер в докладе «Подтопление застроенных территорий» изложили закономерности развития этого процесса на городских территориях и дали эмпириическую формулу для прогноза процесса подтопления с учетом конкретных геологических условий изучаемой территории. В докладе В. Бочкирева «Инженерно-геологические проблемы аридных зон Казахстана» рассматривается ряд проблем, возникающих в связи с широкой мелиорацией земель и нарушением водно-соляного баланса в толщах грунта. В докладе Ю. Ф. Захарова обсуждаются проблемы, связанные с развитием в Западной Сибири нефте- и газодобывающей индустрии; в докладе Р. С. Зиангирова, А. В. Груздова и Е. С. Дзекцера — требования и содержание паспорта инженерно-геологических условий, составляемого на осваиваемую территорию; в докладе И. П. Зелинского — комплексное применение физи-

ческих, математических и численных методов при лабораторном моделировании устойчивости склонов.

Анализ докладов, поступивших по теме 6, свидетельствует о том, что вопросы охраны геологической среды за короткое время стали одними из важнейших в инженерной геологии. Практически во всех странах мира к ним привовано внимание не только специалистов, но и правительственные органы и населения. В последние годы быстро развиваются теоретические аспекты этой проблемы и технические средства мониторинга геологической среды, все шире используется вычислительная техника для сбора, хранения и обработки получаемой инженерно-геологической информации. В докладах многих зарубежных ученых были даны примеры построения с помощью ЭВМ разрезов, инженерно-геологических колонок и прогнозных инженерно-геологических карт. В нашей стране эти вопросы только начинают разрабатываться. Институтам Госстроя СССР, Минвуза СССР, АН СССР, где ведутся подобные исследования, целесообразно изучить зарубежный опыт и активнее вести разработку этой проблемы.

### **Симпозиум «Инженерная геология и проекты строительства геотермальных объектов»**

Эта необычная для инженерно-геологических конгрессов тема симпозиума вызвана большим практическим интересом к использованию возобновляемого и абсолютно безвредного источника энергии, каким является тепло земных недр. На симпозиуме выступили докладчики из трех стран: Италии, США и Аргентины. Именно в Италии и США начато промышленное использование этого эффективного источника энергии и ныне работает уже шесть гидротермальных электростанций. К 2000 г. планируется довести их мощность до 20 млн. кВт. По расчетам специалистов, к концу столетия на гидротермальных электростанциях будут получать самую дешевую электроэнергию.

В докладах много внимания уделялось геологической оценке геотермальных ресурсов. Высоко оценен потенциал Никарагуа, Мексики и Аргентины, на территории которых на небольших глубинах установлены и предполагаются очень большие запасы гидротермальных ресурсов вулканического происхождения.

Широкомасштабное использование гидротермальных ресурсов сдерживается возможностью возникновения таких опасных геологических явлений, как «наведенная» сейсмичность и проявления вулканической деятельности. Этим и объясняется активное участие инженер-геологов в решении проблемы использования тепловых ресурсов Земли.

Предотвращение нежелательных геологических процессов возможно путем применения в проектах гидротермальных систем различных предventивных мероприятий, выбора таких проектных решений, оптимальных объемов и технологий извлечения тепловых ресурсов, которые будут способствовать стабилизации окружающей геологической среды и не будут провоцировать сейсмические и вулканические возмущения. Залогом успеха в реализации столь осмотрительной технической политики является исчерпывающая информация о геологическом строении будущей гидротермальной геотехнической системы и ее инженерно-геологических условиях. Эта информация должна обеспечивать количественное комплексное инженерно-геологическое прогнозирование последствий строительства теплопотребляющих установок, их эксплуатации, расхода тепловых ресурсов. На ее основе будет разрабатываться наиболее эффективная система инженерно-геологического мониторинга геотермальных объектов и их геологической среды. В связи с этим инженерно-геологические и гидрогеологические условия должны быть изучены с такой полнотой, чтобы по ним можно было достоверно моделировать функционирование-

гидротермальной геотехнической системы. Эта модель позволит предотвращать преждевременную сработку тепловых источников, а также прорыв и подток к эксплуатируемым горизонтам холодных вод.

Для получения информации, необходимой для строительства гидротермальных электростанций, американским и итальянским ученым и изыскателям приходится выполнять обширные геологические, инженерно-геологические, гидрогеологические, теплофизические, геодинамические, палеогеографические, сейсмологические исследования, применяя при этом современную аппаратуру и методику интерпретации результатов. В таких исследованиях решающая роль отводится геофизическим методам. Большие затруднения при эксплуатации подземных тепловых ресурсов как в Италии, так и в США доставили высокая минерализация термальных вод и их повышенная коррозионная активность.

### **Симпозиум «Инженерно-геологические проблемы захоронения ядерных отходов»**

По теме симпозиума было представлено 16 сообщений: по 4 из Аргентины и ФРГ, 2 из Швеции, по 1 из Канады, США, Индии, Финляндии, Франции, Швейцарии.

Инженерно-геологическая проблема захоронения радиоактивных отходов приобрела актуальность сравнительно недавно, в связи с возникшими глобальными проблемами охраны геологической среды. На симпозиуме рассматривались технические варианты захоронения радиоактивных отходов в различных геологических формациях и структурах. Изучена возможность создания хранилищ отходов на длительные сроки в скальных (граниты, гнейсы, базальты), аргиллитоподобных (глины, сланцы), хемогенно-осадочных (эвапориты, солевые толщи) породах.

Инженерно-геологические и гидрогеологические условия мест захоронения радиоактивных отходов должны исключить возможность их попадания в биосферу (многобарьерный принцип). Для технической изоляции отходов (первый барьер) применяются упаковки (контейнеры) и искусственные изолирующие материалы. Задача такой защиты — свести к минимуму возможные потери и обеспечить невозможность химических реакций между захороняемыми отходами и вмещающими породами. Грунты и горные породы, являющиеся естественными барьерами, должны гарантировать захоронение отходов с учетом гидрогеологических (гидравлических) условий, исключающих просачивание вод, контактирующих с захоронениями.

В генеральном докладе проф. М. Лангер (ФРГ) изложил основные принципы многобарьерной безопасности. Они основаны на совместном изучении технических систем, систем горной механики и геолого-тектонических систем в их прогнозном аспекте. При этом должны исследоваться коррозионно-прочностные свойства изолирующих материалов и долгосрочное развитие термальных геохимических процессов в массивах пород, а также выполняться термомеханические расчеты давлений и деформаций сфер возможного размещения отходов. Анализируются все теоретически возможные варианты (случайности, аварии) разрушения мест захоронений: нарушение изоляций, взрывы в пластах, геологические и тектонические катастрофы. Рассматриваются критерии устойчивости, критерии безопасности, возможности возникновения экстремальных ситуаций. Подчеркивается необходимость организации мониторинга на всех стадиях — изучения места захоронения, строительства и эксплуатации хранилищ.

В Аргентине исследуются критерии радиологической безопасности и вопросы создания хранилищ радиоактивных отходов в глубоких геологических структурах. В докладе А. Гонсалеса и др. обсуждались проекты

размещения и утилизации радиоактивных отходов в Аргентине, предусматривающие удовлетворение потребностей национальной атомной программы. План рассчитан до конца текущего столетия. Для захоронения отходов энергетики потребуется приблизительно 3 тыс. контейнеров из нержавеющей стали диаметром около 0,6 м и длиной 1,6 м. Ставится задача — обеспечить изоляцию продуктов распада на первую тысячу лет. Однако для долгоживущих продуктов распада (миллионы лет) проблема остается нерешенной.

На территории Аргентины места захоронения ядерных отходов при отсутствии соляно-купольных структур выбираются в стабильных гранитных массивах со слабым водообменом, на глубинах в несколько сот метров. При этом рекомендуется избегать сейсмически активных зон и мест действующих и потенциально возможных горных разработок. На юге Аргентины, в провинциях Чубут и Рио Негро, выделено семь геологических структур. Они изучаются по аэрофотоснимкам, здесь ведутся геолого-геофизические исследования скальных массивов, геоморфологический и гидрогеологический анализ площадей, бурение на глубину до 200—800 м. В настоящее время исследуются водопроводящие свойства массивов пород для определения критериев безопасности.

На симпозиуме был сделан не предусмотренный программой доклад «Комментарий к американской программе размещения высокорадиоактивных отходов в геологических захоронениях» (Л. Эриксон). В США к концу текущего века планируется сооружение первого геологического хранилища для перманентного размещения радиоактивных отходов. Оно проектируется в виде большой подземной шахты с системой туннелей. Многобарьерная система изоляции включает природные барьеры (геологическое, гидрогеологическое и геохимическое условия мест захоронений) и искусственные (упаковки с отходами и подземное оборудование).

Отходы могут быть рассортированы по различным категориям в зависимости от происхождения, уровня радиации и потенциальной опасности. Рассмотрены условия захоронения высокорадиоактивных отходов (HLW) — отработанное ядерное топливо и трансурановых отходов (TRU) — искусственные элементы тяжелого урана, имеющие средний уровень радиации и длительный распад. Большая часть этих отходов получается в результате работы оборонной промышленности.

Программа рассчитана на 10 лет и предусматривает захоронение радиоактивных отходов в глубоких геологических структурах в соляных толщах, а также в базальтах и других кристаллических породах на территории США.

Для захоронения в соляных отложениях (район Деф Смит, штат Техас) необходимо создание хранилищ радиоактивных отходов в пермских эвапоритах (преимущественно галит). Глубина хранилища 730—760 м, наименьшая температура — около 27°С. Мощность соляных накоплений — около 200 м, отложения неоднородны, с прослойями, создающими потенциально неустойчивые блоки. По физико-механическим характеристикам соляные породы относятся к среднепрочным, сильно деформируемым при одноосных нагрузках. Для компенсации пластических деформаций пустоты камер хранения должны засыпаться, что затруднит последующее извлечение контейнеров с отходами. Выполняются специальные геомеханические исследования условий работы соляных массивов и моделирование гидрогеологических процессов.

К. Кеннеди (Канада) сделал анализ гидрогеологических параметров по данным глубокого бурения для оценки условий создания хранилищ радиоактивных отходов. Управление атомной энергетики Канады решает задачу захоронения ядерных остатков в глубоких горизонтах интрузивных пород Канадского щита. Работы начаты в 1974 г. по правительству программе.

Скандинавские страны представили серию докладов по созданию складов радиоактивных отходов в гранито-гнейсах. К. Морфельд (Швеция), председатель комиссии МАИГ по захоронению радиоактивных отходов, поделился опытом строительства подземных хранилищ для нефти (20 млн. м<sup>3</sup>), складов для оборудования, помещений для специальных нужд (клубы, зоны отдыха, спортзалы). Он отметил, что главное беспокойство сегодня вызывают высокоактивные отходы от энергетической промышленности, их безопасное захоронение. За последние десятилетия атомная энергия стала одним из основных источников энергии. Ею пользуются более 25 стран, причем в 1984 г. мировое производство электроэнергии составило 1300 млрд. кВт·ч. В большинстве стран атомная энергетика продолжает развиваться, и к 1990 г. предполагается мировая выработка электроэнергии в 2000 млрд. кВт·ч.

В целом в докладах на симпозиуме был отражен современный уровень исследований проблемы захоронения атомных отходов и проявилась озабоченность многих стран сегодняшним состоянием проблемы. В представленных докладах имеются ценные рекомендации по использованию для хранилищ соляных, слаботрециноватых скальных, слабоводопроницаемых глинистых и мергелистых пород и даже донных образований Атлантического океана. Материалы подлежат тщательному изучению советскими специалистами с целью использования их в отечественной практике.

### Заседания Совета и Генеральной ассамблеи МАИГ

Заседания Совета МАИГ проходили 18, 19 и 24 октября 1986 г. Повестка заседаний включала 17 пунктов, в том числе отчет генерального секретаря и казначея ассоциации, прием в МАИГ новых членов, отчеты вице-президентов, подготовка к проведению XXVIII Международного геологического конгресса в Вашингтоне в 1989 г., информация о предстоящих международных симпозиумах по линии МАИГ в 1987—1991 гг., о VI Международном конгрессе по инженерной геологии и др.

Генеральный секретарь МАИГ М. Примель сообщил, что на 1 октября 1986 г. МАИГ насчитывает около 4800 членов из 78 стран, причем в 50 странах созданы национальные группы инженер-геологов (4450 членов), остальные представлены индивидуальными и ассоциативными членами. На заседании в Буэнос-Айресе в состав МАИГ были приняты Вьетнам, Марокко и Норвегия. Генеральный секретарь отметил постоянное увеличение интереса к публикуемому ассоциацией «Бюллетеню МАИГ». За прошедшие 4 года его тираж увеличился на 700 и достигает сейчас 4300 экземпляров.

На заседаниях Совета были заслушаны и утверждены отчеты вице-президентов по регионам: по Западной Европе — проф. М. Лангера, Северной Америке — Д. Варнеса, Южной Америке — Г. Римолди, Азии — Ванг С., Австралии — Д. Белла, был оглашен доклад вице-президента от Восточной Европы М. Матулы.

Большое внимание было уделено обсуждению подготовки предстоящего в Вашингтоне (1989 г.) Международного геологического конгресса, на котором будет работать секция инженерной геологии, и очередного VI Международного конгресса по инженерной геологии. Было принято окончательное решение о проведении VI конгресса по инженерной геологии в Амстердаме (Нидерланды) в августе 1990 г. и утверждена его повестка. Председателем Оргкомитета избран проф. Д. Прайс. Одновременно была рассмотрена и принята к сведению заявка от Португалии на проведение в Лиссабоне VII Международного конгресса по инженерной геологии (1994 г.).

Совет заслушал информацию и утвердил проведение международных симпозиумов по линии МАИГ на 1987—1990 гг.: «Инженерно-геологиче-

ские проблемы в горных районах» (май 1987 г. Пекин, КНР); «Инженерно-геологические проблемы изучения исторических памятников» (23—24 сентября 1988 г. Афины, Греция); «Инженерная геология шельфов и континентальных склонов морей и океанов» (1—6 октября 1988 г. Тбилиси, СССР); «Инженерно-геологические проблемы пустынных зон» (1990 г. Израиль).

Совет обсудил финансовое положение ассоциации и принял решение увеличить членский взнос в ассоциации с 2 до 5 долл. с человека.

Заседание Генеральной ассамблеи МАИГ состоялось 24 октября 1986 г. Генеральная ассамблея заслушала и утвердила отчеты генерального секретаря Л. Примеля и казначея М. Петера о деятельности ассоциации в период между IV и V Международными конгрессами инженер-геологов.

На заседании президент МАИГ проф. М. Лангер сообщил о награждении акад. Е. М. Сергеева почетной медалью Г. Клооса за выдающийся вклад в дело международного сотрудничества ученых различных стран и развитие МАИГ. К сожалению, Е. М. Сергеев по состоянию здоровья не смог приехать на конгресс, поэтому было зачитано его письмо к участникам ассамблеи, в котором он поблагодарил МАИГ за оказанную ему честь.

После этого Генеральная ассамблея приступила к выборам своего руководящего органа — Исполнительного комитета. Президентом МАИГ был избран проф. О. Уайт (Канада), генеральным секретарем — Л. Примель (Франция). В состав Исполкома были избраны два советских ученых: акад. Е. М. Сергеев как бывший президент МАИГ и проф. В. И. Осипов в качестве вице-президента от Восточной Европы. Кроме того, в состав Исполкома вошли бывшие президенты МАИГ: проф. А. Шэдмон (Израиль), акад. К. Заруба (ЧССР), профессора М. Арну (Франция) и М. Лангер (ФРГ), а также вновь избранные вице-президенты: от Западной Европы проф. Р. Оливейра (Португалия), от Северной Америки Р. Киерш (США), от Южной Америки проф. Е. Чиосси (Бразилия), от Африки Бранкард (Берег Слоновой Кости), от Австралии Д. Трудингер (Австралия), от Азии А. Балассубраманиан (Таиланд).

В заключение ассамблеи была заслушана информация о предстоящих международных симпозиумах МАИГ. Член советской делегации чл.-кор. АН ГССР проф. И. М. Буачидзе дал информацию о Международном симпозиуме в Тбилиси (1—6 октября 1988 г.) по инженерной геологии шельфов и континентальных склонов морей и океанов. Члены нидерландской делегации показали фильм об Амстердаме — месте следующего конгресса по инженерной геологии (1990 г.).

### Выводы и предложения

Прошедший конгресс явился важным этапом в развитии инженерной геологии. Он подвел итоги по основным теоретическим и практическим проблемам этой науки, показал ее возросшую роль в решении многих жизненно важных инженерно-хозяйственных задач, решил ряд организационных вопросов. Материалы конгресса будут способствовать дальнейшему развитию научно-технического прогресса в нашей стране в области геологических изысканий под строительство, рационального использования и охраны геологической среды.

Конгресс показал, что одна из важнейших проблем инженерной геологии в настоящее время — антропогенное воздействие на земную кору. Эта проблема имеет не только научное и экономическое, но и глубокое социальное значение.

Стало очевидным, что при решении вопросов рационального использования территорий экономически оправдывает себя предварительная инженерно-геологическая съемка. Наметился значительный прогресс в

области накопления, обобщения и отображения с помощью ЭВМ и специально составленных алгоритмов всей информации, получаемой в процессе инженерно-геологических изысканий. Это открывает огромную перспективу в составлении региональных и локальных прогнозов, выборе оптимальных вариантов размещения инженерных сооружений, разработке постояннодействующих моделей геологической среды отдельных промышленных центров, городов, сельскохозяйственных территорий и т. д.

Впервые на конгрессе состоялся обмен информацией по вопросам захоронения радиоактивных отходов. За последнее время эта проблема приобрела политический характер, поскольку с ней связана глобальная проблема охраны окружающей среды. В материалах конгресса содержатся ценные данные по использованию для хранилищ радиоактивных отходов соляных, слаботрециноватых скальных, слабоводопроницаемых глинистых и мергелистых пород.

Итоги конгресса свидетельствуют о дальнейшем развитии представлений о природе прочности грунтов на основе всестороннего изучения вещественного состава, строения и преобразования пород в ходе геологической истории. Следует отметить, что при классификации горных пород как грунтов и оценке их свойств инженер-геологи разных стран все чаще используют генетический подход, разработанный в нашей стране.

Имеются достижения в области изучения причин и механизма развития таких геологических процессов, как оползни, просадки, карст, абразия берегов, выветривание. Метод прогноза геодинамических процессов все чаще базируется на результатах изучения структуры и напряженного состояния массивов пород, а также на использовании физического и математического моделирования.

Судя по материалам конгресса, повышается роль инженерной геологии при строительстве сооружений и коммуникаций в сложных геологических условиях: на просадочных, набухающих, динамически неустойчивых, слабых органических, а также сильнотрециноватых, закарстованных и загипсованных грунтах. Практика принятия проектных решений при строительстве на таких грунтах без должного инженерно-геологического обоснования считается недопустимой.

Работа конгресса продемонстрировала укрепление авторитета Международной ассоциации инженер-геологов, развитие инженерно-геологических исследований и появление национальных кадров инженер-геологов во многих развивающихся странах. Следует отметить наращивание объемов инженерно-геологических исследований и повышение их качества в Китайской Народной Республике.

Сравнение достижений советской инженерной геологии с состоянием этой науки за рубежом показывает, что в целом уровень инженерно-геологических исследований в нашей стране является высоким. Отечественная инженерная геология находится на передовых позициях и пользуется большим международным авторитетом. В то же время за последние годы наметилось явное отставание в нашей стране в области разработки и выпуска современных приборов и оборудования, необходимых для проведения полевых инженерно-геологических исследований.

Анализ итогов конгресса позволяет наметить первоочередные задачи дальнейшего развития инженерной геологии в нашей стране с учетом требований научно-технического прогресса. К числу таких задач можно отнести следующие: 1) дальнейшую разработку теорий и методов прогноза развития сложных природно-технических систем, в том числе четких критериев и методов научного прогноза изменений в земной коре под влиянием хозяйственной деятельности человека; 2) создание на базе ЭВМ централизованных и региональных банков инженерно-геологических данных, на основе которых исключать дублирование изысканий, развивать приемы оперативной выдачи необходимой информации, осо-

бению на первых стадиях изысканий, внедрять в практику методику автоматизированного построения инженерно-геологических колонок, разрезов, инженерно-геологических карт и ведения прогнозных расчетов; 3) сокращение сроков изыскательских работ, снижение их стоимости и повышение качества на основе широкого применения полевых методов (геофизических, зондирования, прессиометрии и др.). Для решения этой проблемы необходимо создать специализированное предприятие с конструкторским бюро по выпуску современных полевых приборов и установок, укомплектованных совершенными измерительными устройствами и микропроцессорами.

Авторы благодарят членов советской делегации на V Международном конгрессе инженер-геологов, представивших материалы для написания настоящего обзора.

УДК 624.131.1

ГРУЗДОВ А. В., ТРОФИМОВ Б. Т.

**КАРТЫ-СХЕМЫ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГРУНТОВ ОСВАИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ КРУПНЫХ  
ГОРОДСКИХ АГЛЮМЕРАЦИЙ**

В течение ряда лет ПНИИС Госстроя СССР проводит составление крупномасштабных инженерно-геологических карт, которые используются Научно-исследовательским и проектным институтом Генерального плана г. Москвы для обоснования схем инженерной подготовки застраиваемых территорий.

В настоящее время функциональное зонирование застраиваемых территорий городских агломераций, т. е. выделение в их пределах промышленных, селитебных и рекреационных зон, проводимое в рамках генерального плана, как правило, осуществляется без привлечения каких-либо геологических и тем более инженерно-геологических материалов. Размещение зданий и сооружений внутри этих зон во время выполнения проекта детальной планировки также ведется исходя из архитектурных, эстетических и функциональных соображений. Свойства геологической среды при этом практически не учитываются; предполагается, что они учитываются проектировщиками при проектировании отдельных зданий или их серий. Однако в последние годы в связи с ужесточением требований к охране окружающей среды и более широким распространением в городах нежелательных геологических и инженерно-геологических процессов, усложняющих условия освоения и эксплуатации территории, проектировщики и архитекторы постепенно приходят к выводу о необходимости учета свойств геологической среды, и прежде всего прочностных, деформационных и фильтрационных свойств горных пород на стадиях генерального плана и проекта детальной планировки. В то же время анализ имеющихся карт инженерно-геологических условий и карт инженерно-геологического районирования показал, что комплекс сведений, которые они содержат, не позволяет вводить обоснованные уточнения в схемы функционального зонирования территории. Действительно, породы основных геолого-генетических комплексов, слагающих верхние горизонты разреза в активной зоне воздействия сооружений, отражены на карте на уровне групп и реже типов грунтов (по [1]). Эти породы характеризуются большим разнообразием литологических разностей, поэтому их свойства даются с такими диапазонами изменений, что могут быть использованы лишь при самых ориентировочных расчетах несущей способности грунтов.

В связи с этим НИиПИ Генерального плана г. Москвы совместно с ПНИИСом Госстроя СССР выступил инициатором разработки методики составления карт, которые содержали бы более детальную характеристику физико-механических показателей пород как по площади, так и по глубине и могли бы использоваться архитектурно-планировочными организациями на ранних стадиях проектирования. В качестве первоочередной была поставлена задача составления подобной карты масштаба 1 : 25 000 на район Химки-Митино, подготавливаемый к массовой застройке в ближайшие годы.

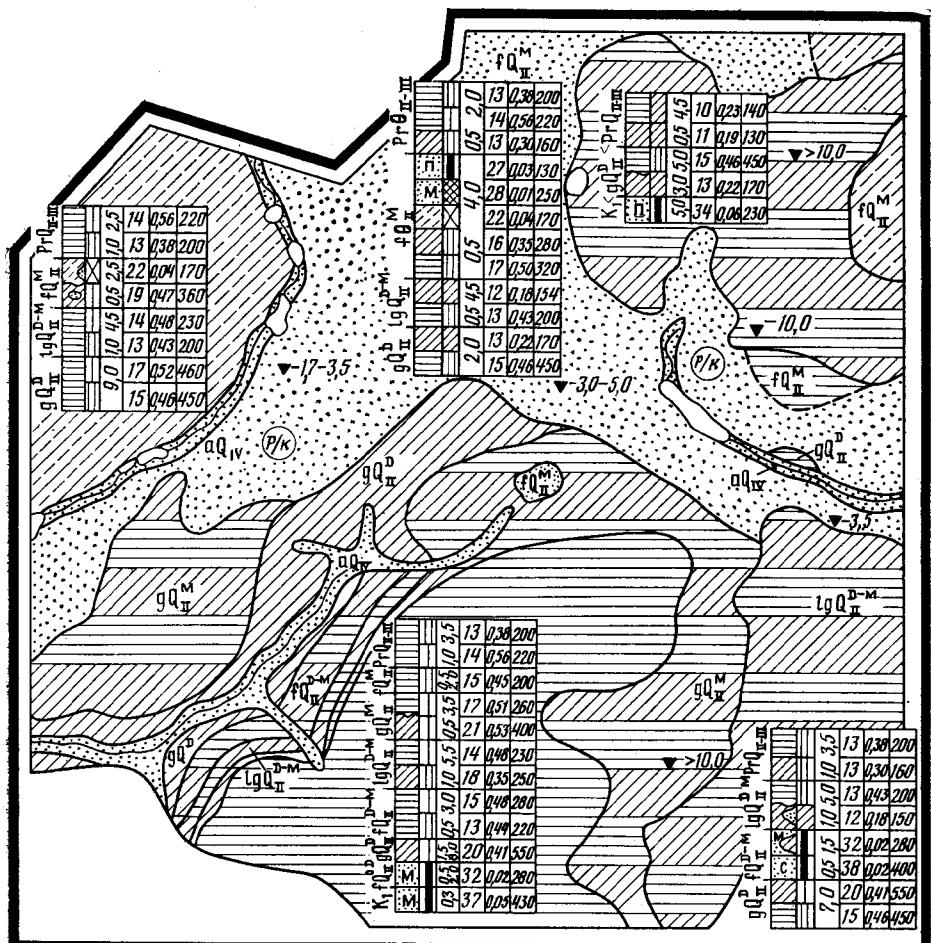
Следует отметить, что различные министерства, ведомства и институты (Минцветмет, Минуглепром, Метрогипротранс и др.) в последние годы уже приступили к созданию специальных инженерно-геологических карт, учитывающих характер производства инженерных работ. Созданные ими карты носят узко специфический характер и не затрагивают проблем промышленно-гражданского строительства в целом, хотя первые публикации и в этом направлении уже есть [4]. Так, например, Минуглепромом СССР разработан ряд карт-резов для различных горизонтов угольных полей, на которых отражены такие специфические инженерно-геологические показатели, как коэффициент крепости горных пород, степень их трещиноватости, водопроницаемости, способность противостоять боковому отпору и т. д. Для промышленно-гражданского строительства сооружений, располагающихся в верхней зоне литосферы (10—20 м), такие карты применяться не могут, так как они не дают полного представления об инженерно-геологических условиях территории. Соответствующих карт, отражающих физико-механические свойства не скальных грунтов, для территории Москвы и других крупных промышленных центров СССР нет, и методика их составления практически не разработана.

Основной целью настоящих исследований являлось выявление инженерно-геологических особенностей грунтов, слагающих верхнюю (чаще всего до 20 м) часть разреза отложений районов Химки-Митино, Косино-Жулебино и Бутово, а также разработка методики и создание карт-схем физико-механических характеристик грунтов, которые в первую очередь необходимы инженерам-проектировщикам для выбора мероприятий по инженерной подготовке осваиваемых территорий на стадиях генерального плана и проекта детальной планировки. Фрагмент одной из разработанных карт масштаба 1:25 000 представлен на рисунке.

В методическом плане составление карт физико-механических характеристик грунтов целесообразно построить следующим образом. На первом этапе на основании сбора, анализа и обобщения всех имеющихся материалов составляется геолого-литологическая карта кровли первого от поверхности выдержанного по мощности геолого-генетического комплекса отложений. Она сопровождается картой мощностей насыпных грунтов и покровных геологических образований соответствующего масштаба. Последняя карта необходима потому, что указанные грунты практически сплошным чехлом незначительной мощности (до 2—3 м) покрывают всю территорию и будут вовлечены в зону воздействия различных зданий и сооружений при малоэтажной застройке. В них также будут расположены различные коммуникации.

На геолого-литологической карте цветом и индексом обозначаются генезис и возраст пород. Затем в пределах каждого поля распространения грунтов определенного геолого-генетического комплекса оконтуриваются площади преимущественного развития грунтов того или иного типа, которые показаны условным крапом. Например, в пределах площади распространения водоно-ледниковых отложений выделены участки преимущественного развития глинистых и песчаных грунтов (см. рисунок). На участках распространения глинистых грунтов неоднородность их строения в плане и по вертикали отражена условным крапом, характеризующим переслаивание или замещение одного типа грунта другим (переслаивание суглинков и супесей, суглинков и глин и т. д.). Неоднородность строения песчаной толщи также показана на карте условным знаком. Таким образом, на геолого-литологической карте все горные породы, слагающие первый от поверхности геолого-генетический комплекс отложений, показаны на уровне типов в соответствии с [1].

На следующем этапе для каждого участка развития того или иного типа грунтов составляются типовые колонки, которые содержат все



1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24

Фрагмент карты физико-механических характеристик грунтов района Бутово (Москва). Геолого-генетические комплексы четвертичных отложений: 1 — современные аллювиальные отложения; 2 — покровные отложения; 3 — флювиогляциальные отложения московской стадии оледенения; 4 — ледниковые отложения московской стадии оледенения; 5 — озерно-ледниковые отложения между моренами днепровского и московского оледенений; 6 — флювиогляциальные отложения между моренами днепровского и московского оледенений; 7 — ледниковые отложения днепровской стадии оледенения; 8 — отложения меловой системы. Литологический состав грунтов: 9 — пески (п — пылеватые, м — мелкие, с — средней крупности, к — крупные, р/к — разной крупности); 10 — супеси; 11 — суглинки; 12 — переслаивание супесей и суглинков; 13 — глины; 14 — переслаивание суглинков и глини; 15 — инженерно-геологическая колонка (а — возраст грунтов, б — литологический состав грунтов, волнистой линией показано переслаивание различных типов грунтов, в — консистенция глинистых или степень влажности песчаных грунтов, г — минимальная и максимальная мощности слоя,  $\delta$  — угол внутреннего трения, град., е — удельное сцепление,  $\text{kgs}/\text{cm}^2$ , ж — модуль общей деформации,  $\text{kgs}/\text{cm}^2$ ). Консистенция суглинков: 16 — полутвердая; 17 — тугопластичная; 18 — мягкот пластичная. Консистенция супесей: 19 — пластичная. Степень влажности песчаных грунтов: 20 — влажные; 21 — насыщенные водой; 22 — глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта (в числите), степень агрессивности (в знаменателе). Границы: 23 — геолого-генетических комплексов; 24 — различных по составу грунтов в пределах одного геолого-генетического комплекса.

основные сведения, необходимые проектировщикам на данных стадиях работ. В первой графе колонок отражено геолого-генетическое строение толщи пород до глубины 20 м и их состав, во второй — характеристика современного состояния пород (консистенция глинистых грунтов, степень влажности песчаных грунтов), в третьей — максимальные и минимальные мощности каждого геолого-генетического комплекса грунта. В последующих графах приведены обобщенные показатели значений угла внутреннего трения, удельного сцепления и модуля общей деформации.

Колонки составлены с учетом физико-механических характеристик покровных отложений, т. е. они отражают полный геологический разрез отложений данного района. В них приведены обобщенные показатели для каждого преобладающего в разрезе вида грунта. Эти показатели получены в результате статистической обработки результатов определений характеристик в соответствии с [2]. Нормативные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов приведены по результатам испытаний свойств грунтов на отдельных участках и откорректированы в соответствии с табл. 1, 3 приложения I СНиП 2.02.01—83 [3]. Они даются для каждого слоя, отличающегося составом или особенностями состояния, и позволяют вести расчет оснований по обоим предельным состояниям.

Таким образом, на карте четко видны границы различающихся по физико-механическим свойствам горизонтов и слоев горных пород, определяющие применение тех или иных типов фундаментов при данном виде застройки.

На заключительном этапе на карту физико-механических характеристик грунтов условным знаком наносятся уровни залегания первого от поверхности водоносного горизонта и степень агрессивности грунтовых вод по отношению к бетону и растворам, выполненным на портландцементе. Карта сопровождается пояснительной запиской и томом фактического материала.

В заключение отметим, что, наложив карту мощностей насыпных и покровных отложений на карту физико-механических характеристик грунтов, мы можем получить характеристику состава и свойств грунтов на любом участке рассматриваемого района. Для того, чтобы получить конкретные значения свойств грунтов в определенной точке территории, следует использовать карту инженерно-геологической изученности и таблицы свойств грунтов, приведенные в томе фактического материала.

В районах со сложным геологическим строением, где в верхней двадцатиметровой толще разреза залегает переслаивающаяся пачка песчано-глинистых грунтов различного генезиса, перекрытая маломощными покровными и насыпными отложениями, необходимо составлять карту-срезку физико-механических характеристик грунтов по глубинам в зависимости от вида планируемой застройки. Необходимо также составлять карту распространения и мощностей насыпных и покровных или других перекрывающих отложений, которая является картой-накладкой на основную. Кarta-срезка физико-механических характеристик грунтов должна сопровождаться инженерно-геологическими колонками для каждого участка распространения грунтов того или иного типа, причем колонки должны быть «надстроены» перекрывающими грунтами, а показатели свойств грунтов в них должны приводиться в соответствии с [1] на уровне разновидностей. На полученную карту следует наносить элементы гидрогеологической обстановки. Кarta физико-механических характеристик грунтов обязательно должна сопровождаться картой инженерно-геологической изученности территории, чтобы была наглядна и ясна обеспеченность приводимых в колонках данных.

В результате выполненных исследований по предлагаемой методике впервые составлены крупномасштабные (1 : 25 000) карты физико-меха-

нических характеристик грунтов для районов Химки-Митино, Косино-Жулебино и Бутово. Эти карты были использованы при разработке схем инженерной подготовки этих территорий. Подобные карты могут быть полезными в архитектурных управлениях и проектных мастерских для корректировки вариантов размещения промышленно-гражданских сооружений различного класса. Они позволяют более рационально подходить к выбору зон и площадок строительства на стадиях генерального плана и проекта детальной планировки. Их использование на стадии предпроектных проработок позволит также аргументированно обосновать характер и объемы инженерно-геологических изысканий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный стандарт Союза ССР. Грунты. Классификация. ГОСТ 25 100-82. М.: Изд-во стандартов, 1982.
2. Государственный стандарт Союза ССР. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик. ГОСТ 20 522-75. М.: Изд-во стандартов, 1975.
3. Строительные нормы и правила. Основания зданий и сооружений. СНиП 2.02.01—83. М.: Стройиздат, 1985.
4. Штокаленко Г. В. Инженерно-геологическое обоснование градостроительных объектов//Проектирование и инженерные изыскания. 1985. № 3.

ПНИИИС

Поступила в редакцию  
14.VI.1986

УДК 624.15 : 624.139

ТЕР-МАРТИРОСЯН З. Г., ДЕМИН И. И.

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ**

Важной особенностью структурно-неустойчивых грунтов является их дополнительное деформирование при увлажнении. Существующие в настоящее время методы прогноза напряженно-деформированного состояния массивов структурно-неустойчивых грунтов используют такое положение, при котором при определении дополнительных деформаций следует исходить из начального напряженного состояния, сформировавшегося в массиве грунта до увлажнения. Однако в процессе возникновения и развития дополнительных деформаций исходное напряженно-деформированное состояние такого массива претерпевает значительные изменения. Это обусловлено, во-первых, воздействием влажностного поля, вследствие чего грунтовое пространство становится неоднородным по деформационным свойствам, а во-вторых, возникновением влажностных напряжений набухания или просадки. Отсюда следует, что процесс влажностного деформирования массива носит сложный пространственно-временной характер и сопровождается значительными изменениями полей влажности и напряженно-деформированного состояния.

Изменение влажностного состояния массивов структурно-неустойчивых грунтов может быть вызвано многими природными и антропогенными факторами: инфильтрацией влаги через поверхность, повышением влажности под зданиями и дорожными одеждами вследствие экранирования, повышением уровня грунтовых вод, утечками влаги из подземных коммуникаций и образованием техногенного горизонта, распространением влаги от каналов и водохранилищ, а также другими нарушениями естественного режима аэрации. Накопление и перераспределение влажности часто приводит к нарушению устойчивости структурно-неустойчивых грунтов, изменению физико-механических свойств грунтов, увеличению и неравномерности осадок сооружений, уменьшению несущей способности основания. Это вызывает необходимость разработки новых методов учета воздействия нестационарного влажностного поля, а также возникновения и развития экзогенных геомеханических процессов набухания и просадки.

В настоящей статье на основе развития и совершенствования температурно-влажностной аналогии [9] предлагаются теория влагоупругости неоднородных массивов структурно-неустойчивых грунтов и разработанные с ее помощью прикладные методы количественного прогноза напряженно-деформированного состояния основания при воздействии статических внешних нагрузок, собственного веса и нестационарного поля влажности.

Формирование и трансформация напряженно-деформированного состояния в массивах структурно-неустойчивых грунтов под влиянием инфильтрационного движения влаги представляет собой сложный физико-механический процесс, зависящий от большого количества факторов. Тем не менее, как установлено многочисленными экспериментами [4, 6, 7 и др.], основными параметрами, определяющими деформацию среды  $\epsilon$ , при статических и квазистатических воздействиях, являются дей-

ствующее напряжение  $\sigma$  и влажность  $W$ . Обобщенное уравнение состояния для деформаций в одномерном случае может быть записано в виде

$$\varepsilon(\sigma, W) = \frac{\sigma}{E(W)} + \varepsilon_0(\sigma_0, W), \quad (1)$$

где  $E(W)$  — модуль общей деформации грунта,  $\varepsilon_0$  — влажностная деформация неоднородной грунтовой среды, зависящая как от влажности, так и от начального напряжения  $\sigma_0$ , действовавшего в точке среды до изменения влажности.

Уравнение (1) является общим физическим уравнением влагоупругости неоднородных сред, справедливым для всех видов влагоупругих деформаций. Оно имеет две специфические особенности. Первой из них является учет явной зависимости  $E(W)$ , которая отмечается многими экспериментаторами [1, 2, 7 и др.]. Вторая особенность заключается во введении функции  $\varepsilon_0(\sigma_0, W)$ , которая определяет как тип влажностной деформации, так и законы, управляющие процессом деформирования. Этую функцию можно представить в расщепленной форме

$$\varepsilon_0(\sigma_0, W) = \beta(\sigma_0)\Psi(W), \quad (2)$$

где  $\beta(\sigma_0)$  — коэффициент набухания или просадки,  $\Psi(W)$  — функция влажности.

Представление (2) подтверждается результатами аппроксимации ряда экспериментальных данных по изучению относительных набухания и просадочности грунтов, приведенных в работах [4, 6, 9 и др.]. Кроме того, температурно-влажностная аналогия Н. А. Цытовича — З. Г. Тер-Мартиросяна [9] является предельным частным случаем соотношений (1) и (2) при  $E=E_0$ ,  $\beta(\sigma_0)=\beta_0$ ,  $\Psi(W)=W-W_0$  и справедлива в предложении малости изменений функций  $\sigma$  и  $W$ , однородности и изотропности грунтовой среды. В отличие от этого, предлагаемое уравнение (1) позволяет учесть широкий круг экспериментальных факторов — неоднородность, мощность активной зоны набухания или просадки, изменчивость коэффициентов деформирования и др. При этом сохраняются все преимущества теории линейно деформируемых сред.

Для случая плоской деформации физические уравнения влагоупругости записутся в виде

$$\sigma = E(W)[D](\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (3)$$

где  $\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T$  — вектор напряжений,  $[D]$  — матрица приведенных коэффициентов Ламе,  $\varepsilon = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$  — вектор деформаций,  $\varepsilon_0$  — вектор влажностных деформаций, определяемый по формуле

$$\varepsilon_0 = (1+v)\Psi(W) \begin{Bmatrix} \beta_x(\sigma_{0x}) \\ \beta_y(\sigma_{0y}) \\ 0 \end{Bmatrix} = (1+v)\Psi(W)\beta(\sigma_0), \quad (4)$$

$v$  — коэффициент Пуассона,  $\beta(\sigma_0)$  — вектор коэффициентов набухания или просадки,  $T$  — знак транспонирования.

Формулы (3) и (4) позволяют учесть не только неоднородность, но и анизотропию влажностного деформирования грунтовой среды, т. е. наличие, например, горизонтального набухания при отсутствии вертикального, разные законы деформирования в направлении осей  $x$  и  $y$  и другие факты, неоднократно отмечавшиеся в экспериментах [7].

Экстремальная постановка задачи отыскания поля перемещений  $u$  в плоскодеформированном основании следующая: для данного распределения поля влажности  $W(x, y, t)$  в момент времени  $t$  найти соответствующий этому моменту вектор перемещений  $u(x, y)$ , определенный и непрерывный в замкнутой области  $F$  вместе со своими производными, удовлетворяющий на границе  $S$  области кинематическим граничным ус-

ловиям и минимизирующий полную потенциальную энергию деформации

$$J(\mathbf{u}) = \iint_F \{E(W)([A]\mathbf{u})^T [D](0,5[A]\mathbf{u} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) - \mathbf{u}^T \mathbf{p}\} dF - \int_S \mathbf{u}^T \mathbf{q} dS - \sum_i P_i \delta_i. \quad (5)$$

Здесь  $\mathbf{p}$  — вектор массовых сил,  $\mathbf{q}$  — вектор распределенных нагрузок, приложенных к области  $F$ ,  $P_i$  — сосредоточенные силы,  $\delta_i$  — перемещения точек приложения этих сил,  $j$  — число сил,  $[A]$  — матрица дифференциальных операций уравнений равновесия теории упругости [5].

Пусть заданная область  $F$  представлена совокупностью  $M$  конечных элементов. Примем, что в пределах одного элемента справедливы соотношения

$$\mathbf{u}(x, y) = [N]\boldsymbol{\delta}_e, \quad (6)$$

где  $[N]$  — матрица функций формы,  $\boldsymbol{\delta}_e$  — вектор перемещений узлов элементов. Подставляя (6) в выражение (5) и минимизируя, получаем для одного элемента:

$$[K]_e \boldsymbol{\delta}_e + \mathbf{R}_{pe} + \mathbf{R}_{qe} + \mathbf{R}_{\varepsilon_0 e} - \mathbf{P}_e = 0, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} [K]_e &= \iint_{F_e} E(W)([A][N])^T [D]([A][N]) dx dy; \\ \mathbf{R}_{\varepsilon_0 e} &= -(1+v) \iint_{F_e} E(W)([A][N])^T [D] \beta(\sigma_0) \Psi(W) dx dy; \\ \mathbf{R}_{pe} &= - \iint_{F_e} [N]^T \mathbf{p} dx dy; \quad \mathbf{R}_{qe} = \int_{S_e} [N]^T \mathbf{q} dS. \end{aligned}$$

Для всей области после суммирования вкладов отдельных элементов имеем

$$[K]\boldsymbol{\delta} + \mathbf{R}_p + \mathbf{R}_q + \mathbf{R}_{\varepsilon_0} - \mathbf{P} = 0. \quad (8)$$

С учетом граничных условий из этой системы линейных алгебраических уравнений определяется итоговый вектор узловых перемещений  $\boldsymbol{\delta}$ , с помощью которого находятся характеристики напряженно-деформированного состояния области по обычным формулам метода конечных элементов [3, 5].

Таким образом, описание процесса деформирования структурно-неустойчивых набухающих и просадочных оснований может быть осуществлено на базе общей теории влагоупругости неоднородных грунтовых сред. Ее основным преимуществом является возможность определения не только осадок поверхности основания, но и изменений его напряженно-деформированного состояния, вызванных инфильтрационным движением влаги. Еще одно достоинство теории заключается в возможности явного учета анизотропии влажностного деформирования основания.

Для получения расчетных методик определения напряженно-деформированного состояния инженерных сооружений необходимо учесть условия протекания влажностных деформаций. В случае набухания грунтов установлено три принципиальных факта: во-первых, набухание может происходить только в той части грунтовой среды, в которой напряжения  $\sigma_{0x}$  и (или)  $\sigma_{0y}$  не больше давления набухания  $P_n$ , во-вторых, влажность среды должна быть меньше влажности набухания  $W_n$ , в-третьих, набухание является обратимым процессом. Первые два условия записываются системой неравенств

$$\begin{cases} \sigma_0 < n \\ W < W_n \end{cases} \quad (9)$$

Свойства просадочной грунтовой среды двойственны по отношению к свойствам набухания. Три основных экспериментальных факта, которые необходимо учитывать, формулируются следующим образом: во-первых, просадка происходит в той части грунтовой среды, в которой напряжения  $\sigma_{0x}$  и (или)  $\sigma_{0y}$  не меньше величины начального просадочного давления  $P_n$ , во-вторых, влажность грунтовой среды должна быть не меньше начальной просадочной влажности  $W_n$ , в-третьих, просадка является необратимым процессом. Так же, как и в случае набухания, первые два условия представляются системой неравенств

$$\begin{cases} \sigma_0 \geq P_n \\ W \geq W_n. \end{cases} \quad (10)$$

В случае сложного распределения нагрузок, а также в местах большой концентрации напряжений вместо  $\sigma_{0x}$  и  $\sigma_{0y}$  в первых неравенствах систем (9) и (10) можно использовать главные напряжения  $\sigma_{01}$  и  $\sigma_{02}$ . Схема применения изложенной теории при этом остается без изменений.

Отмеченный дуализм процессов набухания и просадки дает возможность разработать единую методику расчета структурно-неустойчивых грунтовых массивов на основе несвязанной квазистатической теории влагоупругости неоднородных сред с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Она включает следующие этапы:

1. На основе решения нелинейной задачи влагопроводности при неполном водонасыщении определяется влажностный режим массива грунта в расчетные моменты времени. Методика определения полей влажности подробно описана в нашей статье [8].

2. Производится расчет напряженного состояния массива при отсутствии изменения влажности. С помощью известной экспериментальной или теоретической зависимости  $\beta(\sigma_0)$  и неравенств (9) или (10) определяется активная зона набухания или просадки в данный расчетный момент времени. При этом параметры  $P_n$ ,  $W_n$ ,  $P_n$ ,  $W_n$  могут быть как константами, так и любыми функциями влажности, давления или координат.

3. В данный расчетный момент времени производится перерасчет вектора нагрузок в уравнении (8) с учетом вектора влажностной нагрузки  $R_{e_0}$ , конфигурации и свойств активной зоны набухания или просадки. Все соотношения МКЭ корректируются в соответствии с заданным законом изменения модуля общей деформации  $E(W)$  во всей расчетной области.

4. После применения стандартной последовательности МКЭ определяются окончательные поля НДС в данный расчетный момент времени и осуществляется (при необходимости) переход к следующему моменту времени.

На основе изложенной методики разработан комплекс вычислительных программ, позволяющий в широких пределах моделировать распределение напряжений и деформаций в неодносвязных грунтовых массивах произвольной геометрии. Наиболее сложным моментом теории является учет изменения формы расчетной области по мере развития просадочных деформаций при циклическом увлажнении. В нашей работе использовался шаговый принцип, заключающийся в том, что после изменения знака приращения влажности в некоторый момент времени учет просадочных явлений в соответствующей части области прекращался. Как только начинался следующий цикл возрастания влажности, восстанавливались и учет просадочности. В наиболее ответственных задачах после окончания цикла возрастания влажности производилось изменение сети конечных элементов с учетом произошедшего деформирования, после этого выполнялся расчет на следующий цикл. Эти приемы делают возможным получение достаточно точного прогноза изменений

полей напряженно-деформированного состояния просадочного массива при циклическом увлажнении методами прикладной геомеханики.

Следует особо отметить, что распространение изменений влажности при неполном водонасыщении является медленным физическим процессом. Поэтому для большинства практических задач достаточно выполнить расчет на первом цикле увлажнения, так как последующие циклы сравнительно мало влияют на изменение напряженно-деформированного состояния. Кроме того, если напряжения или деформации в сооружении превысили предельно допустимые, что обычно и бывает при просадке, то дальнейший расчет уже не имеет практического смысла. При этом большое значение приобретает изучение стационарного и квазистационарного распределения полей влажности, так как это позволяет в рамках несвязанной задачи влагоупругости быстро оценить предельное развитие напряженно-деформационного состояния и определить окончательную форму просадочной чаши.

Таким образом, предложенную методику можно без каких-либо затруднений применять при расчетах массивных сооружений мелиоративного, транспортного и промышленного строительства в районах распространения набухающих и просадочных грунтов. Приведем некоторые результаты расчета инженерных сооружений.

В качестве первого примера рассмотрим просадочный массив, содержащий систему трубопроводов, заключенную в бетонную обделку с квадратным сечением  $2 \times 2$  м. Мощность слоя просадочного грунта, подстилаемого жестким основанием, составляет 12 м. В результате мелиорации сельскохозяйственных земель в районе расположения коллектора возможно изменение гидрогеологического режима подстилающих грунтов и подъем уровня грунтовых вод (УГВ) к подошве слоя просадочных грунтов. В связи с этим требуется оценить изменения напряженно-деформированного состояния массива и величину возможной осадки коллектора для разработки комплекса противопросадочных мероприятий.

Моделью массива является квазисплошное тело с обобщенными характеристиками материала:  $E = 10000$  МПа,  $\nu = 0,3$ ,  $\rho = 2,5$  г/см<sup>3</sup>. Характеристики грунта по данным полевых испытаний:  $\nu = 0,25$ ,  $\rho = 1,6$  г/см<sup>3</sup>,  $W_n = 0,1$ ,  $P_n = -0,05$  МПа,  $\beta(\sigma_0) = \beta_0 = 0,2$ . Модуль общей деформации записывается системой интерполяционных функций со следующими узловыми значениями:

$$E(W) = \begin{cases} 50 \text{ МПа при } W \leq 0,05; \\ 25 \text{ МПа при } W = 0,2; \\ 15 \text{ МПа при } W = 0,3; \\ 10 \text{ МПа при } W = 0,4. \end{cases}$$

Результаты расчета для наиболее опасного случая увлажнения основания непосредственно под коллектором показаны на рис. 1. Просадка приводит к качественному перераспределению полей напряжений в массиве. Если до начала увлажнения распределение  $\sigma$  мало отличается от гидростатического, то после просадки поля  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  содержат как растянутые, так и сжатые зоны, причем величины сжимающих напряжений значительно превышают статические. Растянутые зоны образуются в результате просадочной деформации нижней части массива и его разгрузки. При этом возникают также существенные касательные напряжения. Все напряжения и деформации имеют ярко выраженный концентрационный характер вблизи зоны, соответствующей изолинии  $W = 0,1$ , т. е. принятой в расчете  $W_n$ . Выше этой зоны грунт воспринял дополнительные нагрузки, и образовался достаточно прочный слой арочной формы.

Просадка подошвы коллектора составила около 40 см, максимальная осадка поверхности слоя — 38,5 см, относительная глубина просадочной чаши на поверхности по расчету равна 19,7 см, а на уровне по-

дошвы коллектора — 22,7 см. Отметим, что при отсутствии увлажнения фиктивные расчетные перемещения не превышают 1,8 см.

Таким образом, проникновение грунтовых вод под подошву просадочного слоя симметрично расположению коллектора приводит к существенному изменению НДС слоя просадочного грунта. Другие варианты расположения зоны увлажнения приводят к менее значительным перемещениям коллектора, но могут вызвать его перекос.

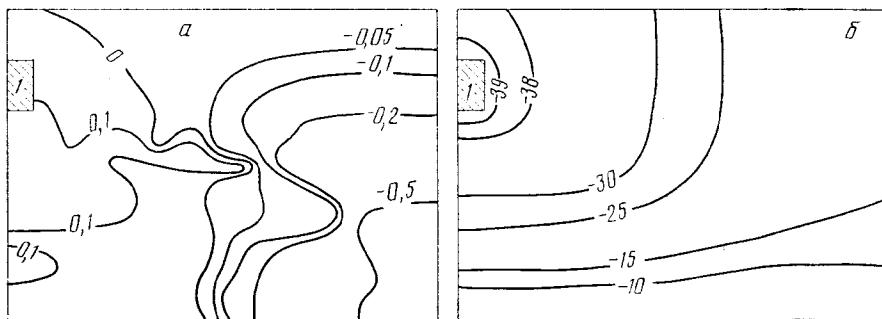


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние просадочного массива с коллектором (1): а — вертикальные напряжения  $\sigma_y$ , МПа; б — вертикальные перемещения  $v$ , см

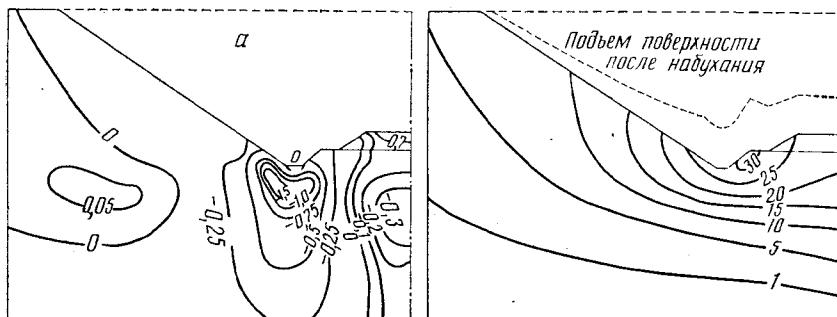


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние основания железнодорожной выемки в набухающем грунте: а — вертикальные напряжения  $\sigma_y$ , МПа; б — вертикальные перемещения  $v$ , см

Другим примером разработанной в статье методики является расчет железнодорожной выемки в слое набухающего грунта. Глубина выемки для подъездного одноколейного пути равна 6 м. В результате нарушения гидроизоляции водоотводных кюветов произошло проникновение воды в основание. Ставится задача оценки напряжений и деформаций в основании верхнего строения пути, которая необходима для разработки компенсирующих мероприятий. С учетом данных инженерно-геологических изысканий были принятые следующие расчетные характеристики основания: коэффициент набухания  $\beta(\sigma_0) = \beta_0 = 0,8$ ,  $v = 0,25$ ,  $\rho = 1,8 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $P_n = -0,2 \text{ МПа}$ ,  $W_n = 0,15$ ;  $E = 40(1-W) \text{ МПа}$ . Верхнее строение моделируется двухслойной конструкцией, состоящей из песчаной подушки с  $E = 130 \text{ МПа}$  и  $\rho = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$  и слоя, содержащего щебень, шпалы и рельсы с расчетными характеристиками  $E = 500 \text{ МПа}$  и  $\rho = 1,6 \text{ г}/\text{см}^3$ . В кювете задается граничное условие  $W = 0,25$ .

Результаты расчета, показанные на рис. 2, позволяют сделать вывод о значительном изменении напряженно-деформированного состояния основания в результате симметричного увлажнения. Под кюветом возникает зона концентрации сжимающих напряжений. Под верхним строением появляются значительные растягивающие напряжения  $\sigma_y$ , которые могут повлечь за собой трещинообразование и ослабление несу-

щей способности подстилающих слоев. Максимальный подъем верха земляного полотна составляет 24,6 см, что значительно превышает нормативно допустимую величину. Кроме того, происходит раздвижка рельсовой колеи на 4 см, что делает невозможной эксплуатацию подвижного состава. Существенно искажается профиль выемки.

В случае исправной гидроизоляции кюветов деформации пути не выходят за нормативные пределы, так как гидротермическое движение поверхности грунта за пределами выемки не приводит к изменению НДС основания верхнего строения. Одностороннее увлажнение из кювета вызывает перекос пути, однако значения характеристик НДС при этом меньше, чем в случае симметричного увлажнения.

Таким образом, предложенная в статье общая теория влагоупругости позволяет осуществлять прогнозирование напряженно-деформированного состояния массивов структурно-неустойчивых грунтов при любом режиме увлажнения. При этом должны быть использованы как результаты лабораторных испытаний, так и данные инженерно-геологических исследований по определению физико-механических свойств грунтовых сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абелев Ю. М., Абелев М. Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. М.: Стройиздат, 1979. 272 с.
2. Ананьев В. П., Гильман Я. Д., Коробкин В. И. и др. Лессовые породы как основания зданий и сооружений. Ростов н/Д: Изд-во Ростов. гос. ун-та, 1976. 215 с.
3. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
4. Круглов В. И. Расчет фундаментов на просадочных грунтах. М.: Стройиздат, 1972. 176 с.
5. Леонтьев Н. Н., Демин И. И. Метод конечных элементов в задачах теории сооружений. М.: Изд-во МИСИ, 1979. 76 с.
6. Мустафаев А. А. Основы механики просадочных грунтов. М.: Стройиздат, 1978. 263 с.
7. Сорочан Е. А. Строительство сооружений на набухающих грунтах. М.: Стройиздат, 1974. 225 с.
8. Тер-Мартиросян З. Г., Демин И. И., Демина Е. А. Нелинейная задача влагопроводности при неполном водонасыщении//Докл. АН СССР. 1983. Т. 272. № 3. С. 567—570.
9. Цытович Н. А., Тер-Мартиросян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Вышш. шк., 1981. 318 с.

Московский инженерно-строительный  
институт

Поступила в редакцию  
14.VII.1986

УДК 624.131

ГОРБАЦЕВИЧ Ф. Ф.

## ПРОЯВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРЕПКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД

Как правило, все твердые среды в процессе нагружения проявляют нелинейность связи между деформациями и напряжениями [2], причем отклонения от закона Гука зарегистрированы и для диапазона начальных, малых нагрузок (как при сжатии, так и при растяжении). К настоящему времени установлено, что консолидированные осадочные породы испытывают сложные нелинейные деформации в зависимости от вида нагружения и времени его действия [17]. Закономерности деформирования скальных горных пород изучены не так полно. Эффект нелинейности деформирования кристаллических горных пород в первую очередь проявляется в зависимости модуля упругости и коэффициента поперечных деформаций от нагрузки [18]. При одноосном приложении нагрузки он отмечен для гранитов [19], кварцитов, гнейсов [13], базальтов [20], диабазов, габбро, мрамора [23] и других пород. Нелинейный характер деформирования диабазов, базальтов, габбро, гранитов, известняков отмечен в случае действия всестороннего давления [23, 4].

Для большинства крепких кристаллических пород все же принимается, что зависимость их деформаций от приложенных напряжений близка к линейной. Для практических расчетов употребляют лишь две упругие постоянные: модуль продольной упругости  $E$  и коэффициент поперечных деформаций  $v$ .

С целью выявления общих закономерностей деформирования нами выполнены испытания образцов скальных кристаллических пород Кольского полуострова. Для испытаний были отобраны образцы пород Мурманского гнейсо-гранитного блока, Печенгского, Ковдорского и Хибинского массивов. Инженерно-геологическая характеристика, методика испытаний и порядок обработки графиков деформаций подробно описаны в работе [5]. Специально отметим, что модуль упругости  $E_i$  и коэффициент поперечных деформаций  $v_i$  при нагрузке  $\sigma_i$  определялись по наклону касательных, проведенных в точке  $\sigma_i$  кривых деформаций (рис. 1), по формулам

$$E_i = \frac{m_o}{SB_{np}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

$$v_i = \frac{B_{no} \operatorname{tg} \alpha}{B_{np} \operatorname{tg} \beta}, \quad (2)$$

где  $B_{np}$ ,  $B_{no}$  — соответственно масштабные коэффициенты оси продольных и поперечных деформаций,  $m_o$  — масштабный коэффициент оси нагрузки,  $S$  — площадь поперечного сечения образца,  $\alpha$  и  $\beta$  — соответственно углы наклона касательных к осям продольных и поперечных деформаций.

Уравнения (1) и (2) соответствуют выражениям

$$E_{ci} = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon_{np}}, \quad (3)$$

$$v_{ci} = \frac{\partial \epsilon_{no}}{\partial \epsilon_{np}}, \quad (4)$$

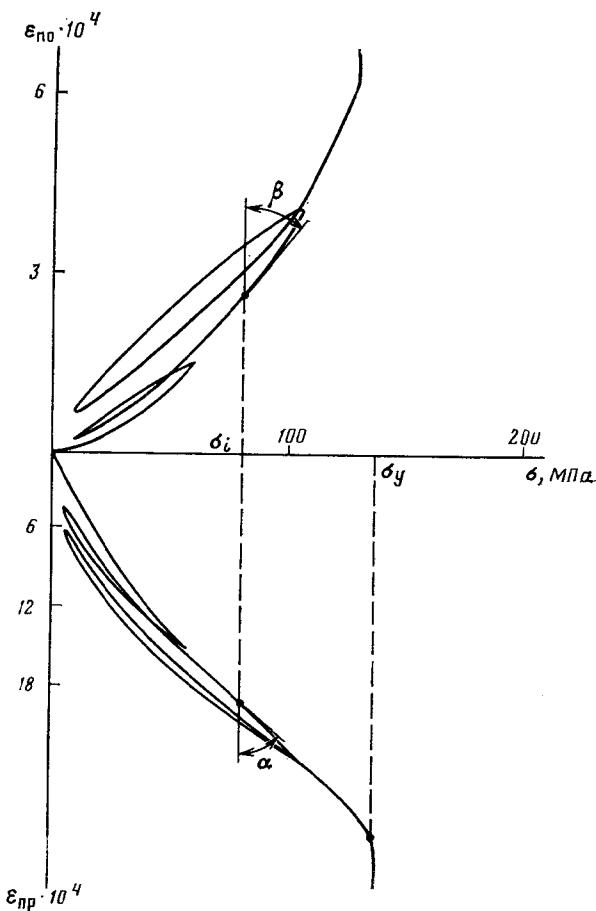


Рис. 1. Графики продольных ( $\varepsilon_{\text{пр}}$ ) и поперечных ( $\varepsilon_{\text{по}}$ ) деформаций образца биотитовых гнейсов (приложение силы || слоистости)

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$ ,  $\varepsilon_{\text{по}}$  — соответственно величины продольных и поперечных деформаций при нагрузке  $\sigma_i$ .

Был рассчитан также относительный предел упругости, определенный как отношение предела упругости  $\sigma_y$  к разрушающей нагрузке  $\sigma_{\text{ph}}$ :

$$P_y = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{ph}}} . \quad (5)$$

Далее были построены графические зависимости  $E_c = f(\sigma)$ ,  $v_c = F(\sigma)$  от начальных нагрузок до  $\sigma_y$ . Наиболее характерные примеры этих зависимостей приведены на рис. 2.

Результаты испытаний, включающие усредненные зависимости  $E_c = f(\sigma)$ ,  $v_c = F(\sigma)$  (совместно со значениями пределов напряжений, в которых они действительны), а также средние величины  $\sigma_y$  и  $P_y$  приведены в таблице.

По результатам испытаний можно выделить пять основных типов деформирования, причем первые три из них ранее наблюдались при испытаниях осадочных пород типа песчаников, аргиллитов и углей [17].

К первому типу относятся породы, которые деформируются с соблюдением зависимости, очень близкой к закону Гука (т. е. линейно) до нагрузки, равной  $\sigma_y$ . Остаточные деформации почти отсутствуют, коэффициент поперечных деформаций сохраняет постоянную величину. При ис-

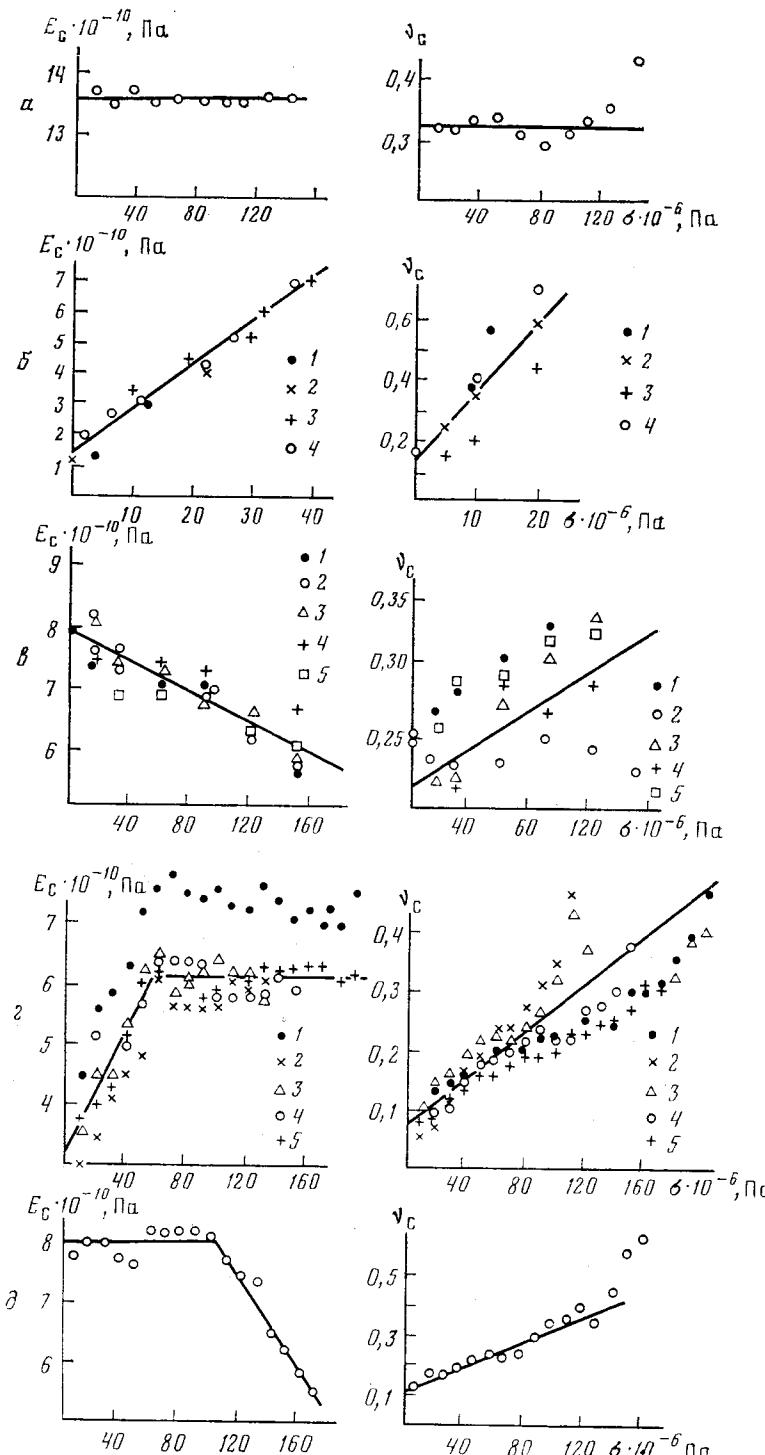


Рис. 2. Зависимости модуля упругости ( $E_c$ ) и коэффициента поперечных деформаций ( $v_c$ ) от нагрузки для образцов горных пород, деформирующихся по различным типам:  
 $a$  — скарн Ковдорского массива (тип I);  $b$  — форстерит-флогопитовая порода Ковдорского массива (тип II);  $c$  — филлиты II слоистости Печенгского массива (тип III);  
 $d$  — биотитовые гнейсы II слоистости Мурманского гнейсо-гранитного блока (тип IV);  
 $e$  — гранатовый амфиболит Мурманского гнейсо-гранитного блока (тип V); 1—5 — номера образцов.

**Характеристика деформирования интрузивных и эфузивных пород Кольского полуострова**

Регион	Порода	Колич- ство образ- цов	Плот- ность $\gamma$ , Т/м <sup>3</sup>	Зависимость для $E_c \cdot 10^{-4}$ в диапазоне $0 < \sigma_n < \sigma_p$	$\sigma_p$	Зависимость для $E \cdot 10^{-4}$ в диапазоне $\sigma_n < \sigma_u$	$\sigma_u$	$P_y$	Зависимость $v_c = F(\sigma)$	$v_{\text{пр}}$	$H_g$ , км	Тип деформи- рования
Печенгский массив	Филлит I слоистости	5	2,45	$7,3 - 1,43 \cdot 10^{-2} \sigma$	—	—	136,0	0,77	$0,215 + 6 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,297	19,3	Третий
	Филлит II слоистости	5	2,45	$7,9 - 1,28 \cdot 10^{-2} \sigma$	—	—	203,0	0,93	$0,238 + 4 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,323	25,4	»
	Габбро-диабаз	2	2,89	$8,4 - 1,8 \cdot 10^{-2} \sigma$	—	—	151,0	0,97	$0,170 + 7,5 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,283	15,2	»
	Серпентинизированный перidotит	31	2,99	$8,5 - 4 \cdot 10^{-3} \sigma$	—	—	180,0	0,82	$0,282 + 1,5 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,309	48,6	»
	Серпентинит	4	2,78	$8,7 - 6,9 \cdot 10^{-3} \sigma$	—	—	136,0	0,86	$0,256 + 9,2 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,384	9,5	»
	Пироксенит	5	3,21	$9,8 - 6,4 \cdot 10^{-3} \sigma$	—	—	201,0	0,94	$0,222 + 8,44 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,390	10,3	»
Ковдорский массив	Форстерит-флогопитовая порода	4	2,67	$1,5 + 1,4 \cdot 10^{-1} \sigma$	—	—	43,0	0,92	$0,43 + 2,3 \cdot 10^{-2} \sigma$	1,42	0,6	Второй
	Форстеритовая порода	1	3,27	$2,25 + 3,85 \cdot 10^{-2} \sigma$	—	—	34,0	0,97	$0,43 + 1,46 \cdot 10^{-2} \sigma$	0,63	0,68	»
	Флогопит-форстеритовая порода	2	3,24	$6,2 + 1,22 \cdot 10^{-1} \sigma$	31,0	10,0	96,0	0,98	$0,16 + 2,7 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,419	3,9	Четвертый
	Флогопит-оливиновая порода	2	3,34	$8,4 + 4,56 \cdot 10^{-1} \sigma$	23,0	12,0	66,0	0,98	$0,48 + 2,7 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,358	3,5	»
Хибинский массив	Бедная апатитовая руда I слоистости	2	2,85	$1,45 + 6,42 \cdot 10^{-2} \sigma$	63,0	5,5	86,0	0,88	$0,035 + 3,83 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,364	4,3	»
	Бедная апатитовая руда II слоистости	2	2,85	$1,9 + 1,24 \cdot 10^{-1} \sigma$	34,0	6,0	59,0	0,81	$0,05 + 1,04 \cdot 10^{-2} \sigma$	0,664	1,5	»
	Апатитовая руда I слоистости Уртиты	1	2,98	$2,8 + 1,42 \cdot 10^{-1} \sigma$	43,0	8,9	80,0	0,91	$0,06 + 3,0 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,30	4,9	»
	Амфиболовый гнейс II слоистости	2	2,75	$7,2 + 1,54 \cdot 10^{-2} \sigma$	—	—	122,0	0,93	$0,175 + 6 \cdot 10^{-4} \sigma$	0,248	19,7	Второй
	Биотитовый гнейс II слоистости	2	2,75	$3,4 + 6,44 \cdot 10^{-2} \sigma$	47,0	6,0	138,0	0,93	$0,07 + 2,64 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,434	6,9	Четвертый
	Плагиограниты Гранатовый амфиболит	5	2,73	$3,3 + 5,19 \cdot 10^{-2} \sigma$	56,0	6,2	164,0	0,98	$0,07 + 2,0 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,398	7,8	»
Мурманский гнейсо-гранитный блок	7	2,68	$3,7 + 4,5 \cdot 10^{-2} \sigma$	62,0	6,5	186,0	0,97	$0,07 + 1,88 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,449	8,5	»	
	1	3,21	8,0	$8,0 - 3,75 \times 10^{-2} (\sigma - \sigma_n)$	102,0	8,0	170,0	0,93	$0,11 + 2,2 \cdot 10^{-3} \sigma$	0,484	5,5	Пятый

Приложение: все величины  $E$ ,  $\sigma$  в МПа.

пытаниях такой тип деформирования обнаружили оливиниты, ийолиты и скарны Ковдорского флогопитового месторождения, а также амфиболиты Мурманского гнейсо-гранитного блока. На рис. 2, *a* в качестве примера линейного деформирования приведены результаты испытаний скарна Ковдорского флогопитового месторождения.

Второй тип деформирования характеризуется прямо пропорциональным нагружке изменением модуля упругости (по А. Кидыбинскому — нелинейная связь вогнутого типа). В среднем зависимость  $E_c=f(\sigma)$  выражается здесь функцией вида

$$E_c=a+b\sigma, \quad (6)$$

где  $a$  — начальный модуль, соответствующий нагрузкам, близким к нулю,  $b=(E_k-a)/\sigma_k$  — коэффициент пропорционального изменения модуля от нагрузки,  $E_k$  и  $\sigma_k$  — конечные модуль и нагрузка на участке пропорционального изменения  $E_c$ . Для пород этого типа зависимость (6) соблюдается при нагрузках до  $\sigma_y$ . По второму типу деформируются форстеритовые и форстерит-флогопитовые породы Ковдорского флогопитового месторождения, а также уртиты Хибинского массива. Изменения величины модуля во всем диапазоне нагрузок могут быть весьма значительны. Например, при значениях  $\sigma_i$ , близких к  $\sigma_y$ , для уртитов  $E_k=1,25 a$ , а для форстерит-флогопитовых пород  $E_k=5,6 a$ . Зависимость коэффициента поперечных деформаций можно аппроксимировать функцией аналогичного вида:

$$v_c=c+d\sigma, \quad (7)$$

где  $c$  — начальное значение  $v_c$  при  $\sigma \rightarrow 0$ ,  $d=(v_k-c)/\sigma_k$ ,  $v_k$  — значение коэффициента поперечных деформаций в конце участка его пропорционального роста (при нагрузке  $\sigma_k$ ).

На рис. 2, *b* приведены экспериментальные зависимости  $E_c=f(\sigma)$ ,  $v_c=F(\sigma)$  для форстерит-флогопитовой породы. На них довольно хорошо выражена линейная зависимость между  $E_{ci}$  и  $\sigma_i$ . При нагрузках, превышающих 10—20 МПа, порода перестает вести себя как сплошное тело ( $v_c \geqslant 0,5$ ).

К третьему типу деформирования относятся породы, модуль которых снижается с ростом нагрузки (по А. Кидыбинскому — нелинейная связь выпуклого типа). Зависимость  $E_c=f(\sigma)$  здесь отличается от формулы (6) знаком перед коэффициентом  $b$ :

$$E=a-b\sigma. \quad (8)$$

По третьему типу деформируются породы Печенгского массива: пироксениты, серпентиниты, филлиты, габбро-диабазы и серпентинизированные перidotиты. Серпентинизированные перidotиты, пироксениты, серпентиниты отличаются относительно малым снижением  $E_c$ , достигающим лишь 10% при нагрузках, близких к  $\sigma_y$ . Модуль филлитов снижается на 32%.

На рис. 2, *c* даны экспериментальные результаты испытаний четырех образцов филлитов (II слоистости) и усредненные зависимости  $E_c=f(\sigma)$ ,  $v_c=F(\sigma)$ . Отметим, что при падении величины  $E_c$  с ростом нагрузки отмечается увеличение коэффициента поперечных деформаций в соответствии с закономерностью, отражаемой формулой (7).

Наибольшее число исследованных разновидностей пород деформируются по четвертому типу. К этому типу относятся флогопит-оливиновые и флогопит-форстеритовые породы Ковдорского массива, апатитовые руды Хибинского массива, а также плагиограниты и гнейсы массива Мурманского гнейсо-гранитного блока. Характер деформирования пород этого типа более сложен. При начальных нагрузках модуль упругости возрастает пропорционально росту  $\sigma$ . Затем после некоторого порогового значения  $\sigma=\sigma_n$  величина  $E_c$  стабилизируется, сохраняясь

в пределах  $\sigma_n < \sigma < \sigma_y$  на одном уровне. На рис. 2, г характер зависимостей  $E_c = f(\sigma)$  и  $v_c = F(\sigma)$  проиллюстрирован на примере деформирования пяти образцов биотитовых гнейсов (II слоистости). Отметим, что и здесь коэффициент поперечных деформаций в среднем возрастает линейно с ростом  $\sigma$  и подчиняется закономерности, выраженной формулой (7). Величина  $E_c$  в процессе нагружения изменяется очень значительно. Например, у флогопит-оливиновой породы Ковдорского массива в диапазоне  $0 < \sigma < \sigma_y$  модуль упругости возрастает на 43%, а у апатитовых руд Хибинского массива — на 280%.

При испытаниях образца гранатового амфиболита массива Мурманского гнейсо-гранитного блока наблюдается пятый тип деформирования (рис. 2, д). Деформирование по этому типу на начальном этапе ( $0 < \sigma < \sigma_n$ ) характеризуется сохранением постоянной величины  $E_c$ . Затем на участке  $\sigma_n < \sigma < \sigma_y$  величина  $E_c$  пропорционально снижается. Коэффициент поперечных деформаций увеличивается пропорционально нагрузке. Пятый тип деформирования является комбинацией первого и третьего типов.

Для пород второго — четвертого типов деформирования в работе [5] предложены соответствующие структурные модели.

Деформирование пород всех типов, выраженное формулами (6), (8), подчиняется общей зависимости

$$E_c = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = a \pm b\sigma. \quad (9)$$

Путем разделения переменных и интегрирования из (9) легко получить, что

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{b} \ln \left( 1 \pm \frac{b}{a} \sigma \right). \quad (10)$$

Если разложить зависимость (10) в степенной ряд, получим:

$$\varepsilon = \frac{b}{a} \sigma - \frac{b^2}{2a} \sigma^2 + \frac{b^3}{3a} \sigma^3 - \dots \quad (11)$$

Зависимость (10) — (11) выражает известный закон Хартига, найденный в 1893 г. в результате испытаний по растяжению кожи, резины, металлов и обожженной глины [15]. Как было обнаружено позднее, закон Хартига является довольно общим и подтвержден результатами испытаний многих классов твердых тел (металлов, дерева, кожи, резины, кости, тканей, строительных материалов, горных пород) [2].

Подробный анализ, выполненный Дж. Ф. Беллом, показал, что результаты исследования изгиба деревянных балок, проведенного Дюпеном (1811 г.), параболический закон Ходкинсона (1849 г.) и Герстнера (1924 г.), выражаящийся формулой:

$$\sigma = x\varepsilon - y\varepsilon^2, \quad (12)$$

данные Баушингера по кручению (1881 г.), результаты интерферометрических экспериментов Грюнайзена (1906 г.), закон Сэйра (1930 г.) и многие другие были экспериментальными проявлениями одного и того же механизма деформирования под нагрузкой. Этот феноменологический механизм деформации, отражаемый законом Хартига, выявляет нелинейность зависимости между нагрузкой и деформацией. Касательный модуль все же остается линейной функцией напряжения.

Закономерности (6) — (11), обнаруженные для кристаллических горных пород, являются результатом взаимодействия под нагрузкой большого, фактически неопределенного числа зерен, их контактов, наличия микротрещин и дефектов на границе зерен и внутри них [23]. Например, в случае роста  $E_c$  и  $v_c$  с увеличением нагрузки можно считать установленным проявление следующего механизма деформирования. На грани-

зде зерен и по плоскостям спайности отдельных минералов (слюды, полевые шпаты и др.) развито большое число очень тонких микротрецнин (трещино-пор) с несомкнутыми в их центральной части берегами [9, 20]. Подобные микротрецнини могли быть образованы в результате действия термонапряжений при кристаллизации и остыании эфузивных и интрузивных пород. В иных породах подобные микротрецнини могут возникать при метаморфических процессах или при действии других факторов, сопровождающихся изменением начального давления и начальной температуры.

Можно оценить величину раскрытия таких микротрецнин для пород четвертого типа деформирования. Вначале (в диапазоне  $0 < \sigma < \sigma_n$ ) происходит смыкание полостей микротрецнин. При  $\sigma = \sigma_n$  поверхности, ограничивающие полость микротрецнини, оказываются сомкнутыми. Суммарную абсолютную деформацию, обусловленную смыканием микротрецнин, можно определить как разницу величин деформаций, рассчитанных при условии линейного роста модуля в пределах от  $a$  до  $E_n$  и при постоянном  $E_n$  ( $\sigma > \sigma_n$ ):

$$\varepsilon_{tp} = h \left[ \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma \right) - \frac{\sigma}{E_n} \right], \quad (13)$$

где  $h$  — высота образцов.

Приведенные в таблице данные, например для биотитовых гнейсов (среднезернистые, II слоистости,  $h=120$  мм), позволяют по формуле (13) оценить величину раскрытия средней микротрецнини величиной  $10^{-3}$  мм. Ширина микротрецнини может быть принята равной среднему размеру зерна, поэтому отношение размера (длина) микротрецнини к ее ширине (раскрытию) ориентировочно составляет  $(1 \div 3) \cdot 10^3$ . Ранее в работе [21] выполнено графическое определение начальной пористости гранитов, аналогичное приведенному расчету.

При приложении сжимающей нагрузки происходит сближение берегов микротрецнин по направлению действия силы и смыкание берегов в области их краев. Края микротрецнин очень острые, поэтому происходит уменьшение размера и площади микротрецнин в проекции на плоскость, перпендикулярную направлению линий действия силы. В процессе нагружения разрушение образца может состояться раньше, чем произойдет полное смыкание микротрецнин. В этом случае феноменологически наблюдается второй тип деформирования. При наличии точки перелома на кривой деформирования, после которой при увеличении нагрузки величина модуля упругости остается постоянной, берега всех микротрецнин, ориентированных по нормали к приложенной нагрузке, оказываются сомкнутыми (четвертый тип деформирования). Можно предполагать, что снижение величин  $E_c$ , обнаруженное при испытаниях пород третьего и пятого типа, связано с уменьшением жесткости их несущего каркаса.

Породы всех типов, кроме первого, характеризуются увеличением коэффициента поперечных деформаций с ростом нагрузки к линейному. Подобные явления описаны в работах [20, 22, 23]. Это означает, что берега всех микротрецнин, ориентированных по направлению действия силы, расходятся. Их размер и площадь увеличиваются. Благодаря концентрации напряжений острые края микротрецнин продвигаются в не нарушенную часть, которую можно назвать «мостиком сплошности». По мере приближения нагрузки к разрушающей размер и площадь микротрецнин становятся больше соответствующих параметров «мостиков сплошности». При нагрузке, равной разрушающей, происходит лавинообразное разрушение «мостиков сплошности», смыкание краев микротрецнин, прорастание и образование магистральных трещин на полную высоту образца. Этот механизм объясняет характерное для хрупких образцов разрушение на тонкие пластины, поверхность которых паралель-

на свободным плоскостям [3, 8]. Аналогичный вид разрушения с отслоениями, параллельными обнаженным поверхностям, наблюдается в подземных выработках [10].

Таким образом, механизм, обуславливающий проявление нелинейности деформирования, состоит в смыкании полостей микротрецин, ориентированных нормально к направлению действия нагрузки, росте размера, площади и величины раскрытия микротрецин, ориентированных в направлении действия нагрузки и разрушении хрупких образцов с образованием поверхностей разрушения, параллельных действию нагрузки.

Как показывают результаты испытаний, разрушение образцов наступает при определенном соотношении между размерами микротрецины и «мостики сплошности». Феноменологически это соотношение выражается величиной предельного коэффициента поперечных деформаций  $v_{np}$ , после достижения которого наступает разрушение. Величины  $v_{np}$ , рассчитанные по формуле

$$v_{np} = c + dP_y, \quad (14)$$

приведены в таблице.

Согласно приведенным данным, диапазон изменения  $v_{np}$  довольно значителен —  $0,283 \div 1,12$ . Данные для флогопит-форстеритовой и форстеритовой пород, а также для бедной апатитовой руды II слоистости показывают, что некоторые кристаллические горные породы сохраняют сплошность и прочностные свойства и при  $v > 0,5$ . Сведения об аналогичном явлении, наблюдавшемся при анализе результатов испытаний песчаников и базальтов, приводятся в работе [20]. Флогопит-форстеритовую, форстеритовую породы и бедную апатитовую руду II слоистости отличает гипидиоморфно-зернистая текстура, слабое сцепление между отдельными зернами и относительно низкие величины пределов упругости и прочности. В случае бедной апатитовой руды повышенному росту коэффициента поперечных деформаций способствует приложение нагрузки, параллельное слоистости.

Сохранение этими породами и рудами прочностных качеств при  $v > 0,5$  не противоречит положениям механики сплошных сред, так как они являются квазисплошными, т. е. состоящими из сплошных объемов, не полностью отделенных друг от друга микротрецинами. Для приведенных пород и руд число микротрецин на единицу объема особенно велико.

Для более крепких разновидностей пород и руд  $v_{np} < 0,5$ , причем для некоторых групп пород эта величина довольно стабильна. Например, для пород третьего типа деформирования  $v_{np}$  изменяется в пределах 0,28—0,39. Для группы пород Мурманского гнейсо-гранитного блока  $v_{np} = 0,4 \div 0,48$ . Стабильность параметра  $v_{np}$  и характеристик  $c$  и  $d$  для отдельных групп пород позволяет оценивать величину действующего (например, в целике) напряжения  $\sigma_u$  и близость его к разрушающей нагрузке по экспериментально измеренной величине коэффициента поперечных деформаций  $v_u$ :

$$\sigma_u = \frac{v_u - c}{d}. \quad (15)$$

Величины  $c$  и  $d$  определяются путем предварительного тарирования. Разность между предельным  $P_y$ , т. е. пределом упругости, и действующим напряжением можно вычислить по формуле

$$P_y - \sigma_u = \frac{v_{np} - v_u}{d}. \quad (16)$$

Рассмотрим еще одно довольно вероятное следствие обнаруженных закономерностей нелинейного деформирования кристаллических пород.

В известной мере полученные закономерности деформирования мож-

но распространить на массив горной породы, находящийся в высоко-напряженном состоянии, поскольку в таких массивах трещины, как правило, сомкнуты [11]. В пределах отдельности не только натурные испытания, но и эксперименты на образцах могут дать правильную качественную, а часто и количественную характеристику деформационных свойств породы [9].

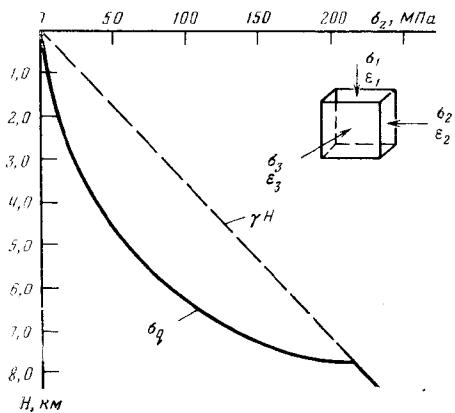


Рис. 3

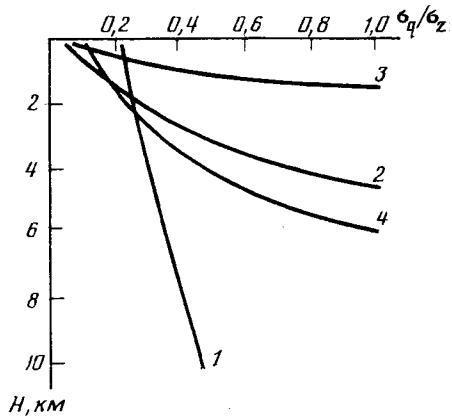


Рис. 4

Рис. 3. Расчетное изменение величины горизонтальной составляющей поля напряжений ( $\sigma_q$ ) с ростом глубины ( $H$ ) для биотитовых гнейсов Мурманского гнейсо-гранитного блока

Рис. 4. Изменение отношения  $\sigma_q : \sigma_z$  с ростом глубины  $H$ : 1 — уртиты; 2 — бедная апатитовая руда, слоистость горизонтальная; 3 — бедная апатитовая руда, слоистость вертикальная; 4 — амфиболовый гнейс, слоистость горизонтальная

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние элементарного объема нелинейно деформирующейся горной породы (рис. 3). Будем считать, что среда деформируется упруго без проявления пластических деформаций в соответствии с представленной выше феноменологической моделью, с сохранением закономерности (6), (7), (10) и с пропорциональным изменением компонентов напряжений. Выполним расчеты при условии сохранения сплошности объема, т. е. в пределах  $0 < \nu < 0,5$ .

Используя известные уравнения теории упругости [1], формулу (10) и принцип наложения, напишем выражения, отражающие обобщенный закон Гука для нелинейно-упругой среды:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_1 \right) - (c + d\sigma_2) \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_2 \right) - \\
 &\quad - (c + d\sigma_3) \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_3 \right), \\
 \varepsilon_2 &= \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_2 \right) - (c + d\sigma_3) \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_3 \right) - \\
 &\quad - (c + d\sigma_1) \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_1 \right), \\
 \varepsilon_3 &= \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_3 \right) - (c + d\sigma_2) \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_2 \right) - \\
 &\quad - (c + d\sigma_1) \frac{1}{b} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_1 \right).
 \end{aligned} \tag{17}$$

Помещая элементарный объем (рис. 3) в массив горных пород, считаем, что направление 1 ориентировано к центру Земли, направления 2

и 3 горизонтальны. В точках массива, лежащих вдали от свободных поверхностей (склонов гор, выработок, камер, скважин), деформации в горизонтальных направлениях не могут быть реализованы, поэтому  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ . Соответственно два последних уравнения из (17) примут вид

$$\begin{aligned} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_2 \right) - (c + d\sigma_3) \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_3 \right) - \\ - (c + d\sigma_1) \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_1 \right) = 0, \quad (18) \\ \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_3 \right) - (c + d\sigma_2) \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_2 \right) - \\ - (c + d\sigma_1) \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \sigma_1 \right) = 0. \end{aligned}$$

Эти уравнения не позволяют выделить  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в явном виде. Поэтому используем выражение (11). Например, если воспользоваться только первым членом ряда, то соответственно из (11) и (18) получим

$$\begin{aligned} \sigma_2 - (c + d\sigma_3) \sigma_3 - (c + d\sigma_1) \sigma_1 = 0, \\ \sigma_3 - (c + d\sigma_2) \sigma_2 - (c + d\sigma_1) \sigma_1 = 0. \quad (19) \end{aligned}$$

Заменим  $\sigma_2 = \sigma_3$  на  $\sigma_q$  — горизонтально ориентированную составляющую, а  $\sigma_1$  — на  $\sigma_z$  — вертикально ориентированную составляющую геостатического (гравитационного) поля напряжений. При этом из (19) получим

$$d\sigma_q^2 - (1 - c) \sigma_q + (c + d\sigma_z) \sigma_z = 0. \quad (20)$$

Если зависимость коэффициента поперечных деформаций от напряжения отсутствует ( $d = 0$ ), то из (20) как частный случай получим известное уравнение А. Н. Динника:

$$\sigma_q = \frac{\nu}{1 - \nu} \gamma H, \quad (21)$$

где  $\nu = c$ ,  $\sigma_z = \gamma H$ ,  $\gamma$  — плотность пород,  $H$  — глубина рассматриваемой точки массива.

Из уравнения (20) при  $d \neq 0$  для  $\sigma_q$  получим

$$\sigma_q = \frac{1 - c \sqrt{1 - (1 - c)^2 - 4d(c + d\sigma_z)\sigma_z}}{2d}. \quad (22)$$

В последнем выражении знак минус перед корнем следует сохранить, чтобы соблюсти неравенство  $\sigma_z \geq \sigma_q$ .

Уравнение (22) следует применять вместо уравнения А. Н. Динника при расчете величины горизонтальной составляющей  $\sigma_q$  поля напряжений, обусловленного весом вышележащих нелинейно деформируемых пород.

Так как гидростатическое распределение напряжений характеризуется соотношением  $\sigma_q = \sigma_z$ , то из (20) получим дополнительное условие, позволяющее определить глубину

$$H_r = \frac{1 - 2c}{2d\nu}, \quad (23)$$

при которой наблюдается указанное распределение. При  $\sigma_q = \sigma_z$  состояние не является гидростатическим в строгом смысле, так как породы сохраняют сопротивление сдвигу. Поэтому состояние горных пород при  $H = H_r$  будем называть квазигидростатическим [6]. Так как коэффициент поперечных деформаций  $\nu \leq 0,5$  (при условии сохранения сплошности породы), то из уравнения (20) получим, что при  $H > H_r$  всегда  $\sigma_q \approx \sigma_z$ .

В таблице приведены величины  $H_r$ , рассчитанные по характеристи-

кам деформирования, в предположении, что вся толща массива сложена породами одного типа. На рис. 3, 4 показаны изменения величины горизонтальной компоненты  $\sigma_q$  и отношения  $\sigma_q : \sigma_z$  с ростом глубины  $H$ .

Приведенные данные позволяют заключить, что глубина  $H_r$  при которой происходит переход к квазигидростатическому состоянию, в значительной степени различна для пород и руд. Например, для форстерит-флогопитовой породы  $H_r = 0,6$  км, для апатитовых руд  $H_r = 1,5 - 4,9$  км, при этом для высокоупругих уртитов  $H_r = 19,7$  км. Следует также отметить, что возрастание горизонтальных геостатических напряжений должно быть нелинейным; градиент их роста увеличивается по мере приближения к глубине перехода к квазигидростатическому состоянию. По нашему мнению, резкий рост  $\sigma_q$ , изменяющий свойства и состояние массива при подходе к глубине  $H_r$ , может быть зарегистрирован методами сейсмозондирования (например, методом отраженных волн).

Расчеты изменений горизонтальных напряжений с глубиной следует рассматривать как оценочные. Например, расчет величины горизонтальной составляющей  $\sigma_q$  на глубине свыше 5—7 км должен быть выполнен с учетом реальных температур земных глубин. На расчетное значение  $\sigma_q$  может быть наложено поле тектонических напряжений [10, 16]. Необходимо также учитывать, что в реальных массивах, включающих переслаивающиеся пачки и свиты пород различного возраста и генезиса, а также сложнопостроенные границы раздела и складки, возможно очень резкое изменение соотношения  $\sigma_q : \sigma_z$ . Экспериментальные результаты, полученные в натурных условиях, показывают, что деформирование массивов на относительно небольших глубинах сопровождается значительными остаточными деформациями и проявлениями пластичности [12].

Вместе с этим правомерность изложенного подхода подтверждается рядом наблюдений, выполненных в натурных условиях подземных сооружений. Наблюдая состояние скального массива в альпийских туннелях, швейцарский геолог Гейм еще в прошлом веке установил, что выработки на относительно большой глубине находятся под влиянием высоких напряжений, действующих на них со всех сторон, причем пространственное распределение этих напряжений близко к гидростатическому. Наблюдения, выполненные при строительстве подземных инженерных сооружений, подтверждают эту гипотезу [7]. Ряд последних измерений [14] также показал, что распределение напряжений в некоторых скальных массивах близко к гидростатическому.

Расчеты горизонтальных сил, произведенные по конкретным инженерно-геологическим разрезам с учетом закономерностей нелинейного деформирования позволяют уточнить модели поля напряжений в пределах верхней части земной коры и более обоснованно оценить устойчивость глубоких подземных сооружений (скважин). Приведенные данные помогут более полно изучить механизмы деформирования поликристаллических тел, процессы их разрушения, разработать критерии разрушения, отвечающие экспериментальным данным.

## Выводы

Большее число крепких кристаллических горных пород Кольского полуострова деформируется упруго и нелинейно до предела, равного 0,77—0,98 от разрушающей нагрузки. Ниже этого предела проявлений пластических деформаций при обычных температурах вообще не обнаружено. Деформирование большинства подвергнутых испытаниям пород подчиняется закону Хартига [15]. Участки линейного роста модуля упругости, рост коэффициента поперечных деформаций при сжатии образцов пород и руд второго — четвертого типов указывает на квази-сплошное состояние их среды. Сплошные объемы, представленные в

основном минеральными зернами, отделены друг от друга микротрецинами таким образом, что между ними сохраняются «мостики сплошности». Трецины, направленные нормально к наибольшему из главных направлений, смыкаются, а направленные вдоль наибольшего из главных напряжений — растут.

В пределах линейного участка величина модуля упругости может измениться более чем в 5 раз по сравнению с начальным. Например, модуль упругости пород Мурманского гнейсо-гранитного блока (границы, гранитогнейсы, гнейсы) при нагрузках, близких к разрушающим, примерно в 2 раза выше, чем начальный. Коэффициент поперечных деформаций, как правило, возрастает в тех же пределах нагрузки в 3—7 раз.

Разрушение пород (второй — пятый тип) предваряется прогрессивным раскрытием микротрецин в направлении наименьшего из главных напряжений. Само разрушение состоит в лавинообразном соединении микротрецин и прорастании магистральных трещин в направлении наибольшего из главных напряжений. Для каждой из разновидностей пород указанных типов может быть найдена предельная величина коэффициента поперечных деформаций  $v_{\text{пп}}$ . Величина  $v_{\text{пп}}$  может служить критерием разрушения. По параметрам линейной зависимости  $v=F(\sigma)$  и  $v_a$  — величине коэффициента поперечных деформаций, измеренной в натурных условиях, может быть определено напряженное состояние целиков и отдельных участков массивов горных пород в окрестности подземных выработок, а также предсказана степень близости их к разрушению.

Расчеты, связанные с определением устойчивости горных выработок и с горным давлением, следует проводить с учетом изменений  $E$  и  $v$  под нагрузкой. Возможности современной вычислительной техники позволяют в значительной мере снизить трудоемкость вычислений.

Нелинейность деформирования скальных кристаллических пород в поле геостатических напряжений верхней части земной коры должна приводить к росту горизонтальной составляющей напряжения относительно вертикальной. На некоторой глубине от земной поверхности (глубине перехода к квазигидростатическому состоянию), зависящей от свойств породы, горизонтальная составляющая по величине должна быть близка к вертикальной, обусловленной весом вышележащих пород.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. шк., 1968. 512 с.
2. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 1. М.: Наука, 1984. 600 с.
3. Введение в механику скальных пород/Под ред. Бока Х. М.: Мир, 1983. 276 с.
4. Воларович М. П., Фан Вей-цин. Исследование упругих свойств горных пород статическими и динамическими методами при высоких всесторонних давлениях// Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. 1962. № 23 (130). С. 19—24.
5. Горбацевич Ф. Ф. Нелинейности деформирования скальных горных пород при статическом нагружении//Инж. геол. 1979. № 4. С. 49—59.
6. Горбацевич Ф. Ф. О переходе к гидростатическому распределению напряжений на больших глубинах//Взаимосвязь геологотектонического строения, свойств, структурных особенностей пород и проявления избыточной напряженности. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1985. С. 147—152.
7. Джегер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. М.: Мир, 1975. 255 с.
8. Ильницкая Е. И., Тедер Р. И., Ватолин Е. С., Кунтиши М. Ф. Свойства горных пород и методы их определения. М.: Недра, 1969. 392 с.
9. Кузнецов С. В., Одинцов В. Н., Слоним М. Э. Методология расчета горного давления. М.: Наука, 1981. 104 с.
10. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.
11. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. М.: Наука, 1968. 110 с.

12. Савич А. И., Ященко З. Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 214 с.
13. Тимченко И. П. Характеристика физико-механических свойств некоторых типов массивных существенно кварцевых пород//Физико-механические свойства горных пород. М.: Наука, 1964. С. 86—111.
14. Ялымов Н. Г., Рогожников О. В., Бердыбеков М. Б. Распределение напряжений в массиве при разработке месторождений в горных районах. Фрунзе: Илим, 1982. 149 с.
15. Hartig E. Der Elastizitätsmodul der geraden Stabes als Funktion der Spezifischen Beanspruchung//Civilingenieur. 1893. B. XXX IX. S. 113—138.
16. Hast N. The measurement of rock pressure in mines//Sver. Geol. undersökn. Ser. C. 1958. № 560. P. 1—183.
17. Kidybinski A. Rheological models of upper silesian Karboniserous rocks//Internat. J. Rock Mech. and Min. Sci. 1966. V. 3. № 4. Nov. P. 279—306.
18. Lama R. D., Yutukuri V. S. Handbook on mechanical properties of rocks. V. II. Trans. Techn. Publ. 1978. 465 p.
19. Obert L., Duvall W. Rock mechanics and design of structures in rock. N. Y. e. a.: John Wiley and Sons, 1967. 651 p.
20. Wagner F. G., Engler R. Fractured rock models of the elastic wave velocities in earthquake areas//Gerlands Beitr. Geophys. 1980. V. 89. № 3/4. S. 311—318.
21. Walsh J. B. The effect of cracks on the compressibility of rock//J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 2. P. 381—389.
22. Walsh J. B. The effect of cracks on Poisson's ratio//J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 20. P. 5249—5257.
23. Walsh J. B., Brace W. F. Elasticity of rock in uniaxial strain//Internat. J. Rock Mech. and Min. Sci. 1972. V. 9. № 1. P. 7—15.

Геологический институт  
КФ АН СССР

Поступила в редакцию  
17.II.1986

УДК 551.252, 624, 131

ТАКРАНОВ Р. А.

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ИРКУТСКОГО УГОЛЬНОГО  
БАССЕЙНА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ**

Большое значение при решении многих вопросов инженерной геологии, гидрогеологии и горного дела имеет прогнозная оценка трещиноватости. Достоверное прогнозирование основывается на знании геологических аспектов происхождения трещиноватости и закономерностей ее проявления по площади и разрезу в породах разного состава.

Вопросы генезиса и закономерностей проявления трещиноватости в угленосных отложениях рассматриваются в широко известных монографиях Г. А. Иванова [4], И. И. Аммосова, И. В. Еремина [1]. Механизм формирования природных трещин освещен в работах В. В. Белоусова [2], Гзовского М. В. [3] и др.; особенности их размещения в складках и пластиах разной мощности изучались А. С. Новиковой [5], И. В. Кирилловой, В. В. Эзом [7] и др. Многим инженерно-геологическим аспектам трещиноватости посвящены работы М. В. Раца, С. Н. Чернышева [6], сотрудников Гидропроекта, ПНИИИСа. Методические и прикладные вопросы решаются в работах геологов-нефтяников и других специалистов.

В статье рассматриваются закономерности проявления и вопросы геологической природы трещиноватости юрских отложений Иркутского угольного бассейна как основы и предпосылки ее прогнозирования. Актуальность проведенных исследований обусловлена общей проблематичностью рассматриваемых вопросов, а также необходимостью решения инженерно-геологических и практических задач эксплуатации месторождений Черемховского и Тулун-Азейского районов, а также промышленного освоения перспективных Вознесенского, Метелкинского, Ишидейского и Мугунского месторождений.

Исследования проводились в Будаговском, Катарбей-Икейском, Тулун-Азейском, Залари-Нукутском, Черемховском угольных районах, расположенных в платформенной западной и центральной части бассейна, в Усть-Ордынском, Заангарском и Прииркутском восточных районах, принадлежащих зоне перехода к Саяно-Байкальской складчатой области. Трещиноватость пластов угля и вмещающих пород изучалась в горных выработках и естественных обнажениях путем массовых замеров ориентировки и нормального расстояния между трещинами, их густоты. Всего проведено около 15 200 замеров ориентировки и 23 700 густоты трещин.

Основной объем трещиноватости в регионе представлен внутриплактовыми трещинами, густота которых зависит от мощности пересекаемого пласта или слоя. В связи с этим при определении закономерностей проявления трещиноватости и ее связи с различными геологическими факторами необходимо, чтобы показатели степени трещиноватости (густота или интенсивность) не зависели от мощности пласта и были сопоставимы. Непосредственно в натуре такие результаты получить затруднительно, так как измерения густоты проводятся в пластах разной мощности. Поэтому из пропорции  $P_{ii}/M = P/100$  вычисляется условный:

Таблица 1

Расстояние между трещинами (см) основной (I) и второстепенной (II) систем в различных тектонических структурах

Тектонические структуры	Уголь		Углистые породы		Алевролиты		Песчаники	
	I	II	I	II	I	II	I	II
Платформа Переходная зона	35—45 34	50 45	85—120 68	95—130 93	75—120 65—105	90—140 75—120	105—135 40—70	125—150 55—75

Таблица 2

Изменение показателя густоты трещин ( $P$ , см) главных (I, II) систем в платформенных районах в зависимости от разной степени метаморфизма

Марка угля	Уголь		Углистая порода		Район, месторождение
	I	II	I	II	
Б <sub>3</sub>	50	60	120	130	Тулун-Азейский
Б <sub>3</sub> —Д	—	—	105	125	Катарбей-Икейский
Д	40	50	95—90	105	Делюрское
Г	35—40	40—50	85—95	95—105	Черемховский

показатель густоты трещин ( $P$ ), характеризующий нормальное расстояние между трещинами при одинаковой (100 см) мощности пластов:  $P = \frac{P_{II}}{M} \cdot 100$ , см, где  $P_{II}$  — измеренное расстояние между трещинами, развитыми в пределах пласта мощностью  $M$ . Интенсивность трещин  $I = 1/P$ , тр/м. Использование показателя  $P$  или  $I$  исключает влияние мощности.

Известно, что общая характеристика степени трещиноватости пород района определяется его тектонической структурой. Это подтверждается сопоставлением наших данных об интенсивности трещиноватости в платформенных районах и в тектонически более активной переходной зоне бассейна, являющейся предгорным прогибом (табл. 1).

Таблица 1 составлена с учетом близости степени метаморфизма отложений сопоставляемых Черемховского платформенного и восточных районов. Влияние степени метаморфизма на интенсивность трещиноватости проявляется в закономерном изменении густоты трещин по площади бассейна. Степень метаморфизма повышается в направлении с СЗ на ЮВ, что обуславливает закономерное уменьшение  $P$  в угольных пластах соответствующих месторождений, расположенных в одинаковых платформенных условиях (табл. 2).

Для иркутских углей характерно однообразие петрографического состава при преобладании в органической массе компонентов группы витринита. Угли в основном гумусовые, гумусово-сапропелевые, преобладают полублестящие, реже полуматовые литотипы, дюрен-клареновые и клареновые разности. Соотношением минерального и органического материала определяется, с одной стороны, степень блеска (литотип), с другой — степень трещиноватости угольных пачек. В обнажении наблюдается максимальное количество трещин в блестящих малозольных углях и минимальное — в матовых, более зольных.

По большому количеству результатов опробования угольных пластов на угледобывающих предприятиях Тулун-Азейского и Черемховского районов были построены графики распределения зольности  $A^d$  разных литотипов угля, углистых и безугольных пород. Соответствующие поли-

тоны распределения  $A^d$  при непрерывном изменении зольности пересекаются между собой и образуют общий полигон изменения  $A^d$  в непрерывном ряду петрографических ассоциаций от угля до породы при разном соотношении органических и минеральных компонентов (золы). Для тех же петрографических групп так же построен график изменения показателя густоты трещин  $P$  главных систем. Графики изменения  $A^d$  и  $P$  взаимно подобны и их «пики» соответствуют друг другу. Таким образом, и статистическими данными подтверждается связь степени трещиноватости

углей и пород с количеством в них минерального материала. Дисперсионным анализом статистических данных определены наиболее вероятные средние значения  $P$  для разных литотипов угля и пород (табл. 3). Корреляционная связь  $P$  и  $A^d$  установлена путем сопоставления результатов опробования угольных пачек и прослоев и замеров в них расстояний между трещинами (рис. 1). Сложный характер зависимости  $P$  от  $A^d$  указывает на то, что при определенном соотношении количества минеральных примесей ( $A^d = 30$  и 70%) и органического материала происходит скачкообразный переход количества в новое качество, в новую геолого-петрографическую ассоциацию органического и минерального материала с новыми свойствами и новой степенью трещиноватости. Кривые  $P = f(A^d)$  для других месторождений имеют идентичную форму. Расположение кривых относительно координатных осей определяется тектонической структурой месторождения и степенью метаморфизма. Например, для буроугольного Тулун-Азейского района, в котором угли и породы менее трещиноваты, кривые  $P = f(A^d)$  располагаются выше графиков на рис. 1.

Соотношение количества минерального и органического материала влияет, кроме того, на количество, взаимное отношение, четкость проявления и стабильность ориентировок систем, а также на морфологию трещин. В блестящих и полублестящих малозольных углях часто развиты три — четыре одинаковые, а в матовых высокозольных — две, неравнозначные системы трещин, из которых основная система представлена четкими, протяженными и выдержаными по морфологии трещинами. В блестящих углях трещины менее протяженны и менее выдержаны по ориентировке и форме, часто имеют глазковую и раковистую поверхность. Изменчивость густоты трещин в блестящих разностях наибольшая (см. табл. 3).

Степень трещиноватости углей зависит также от состава органической массы. Менее трещиноваты угли, содержащие наименьшее количество хрупких и непрочных компонентов группы витринита и наибольшее количество группы инертинита, дюренита, липоидных микрокомпонентов и сапропелевого вязкого и достаточно прочного материала. Например, в гумусовых углях Черемховского района  $P$  для трещин I и II систем в среднем составляет соответственно 40 и 50 см, а в смешанных однотипных гумусово-сапропелевых — 55 и 75 см.

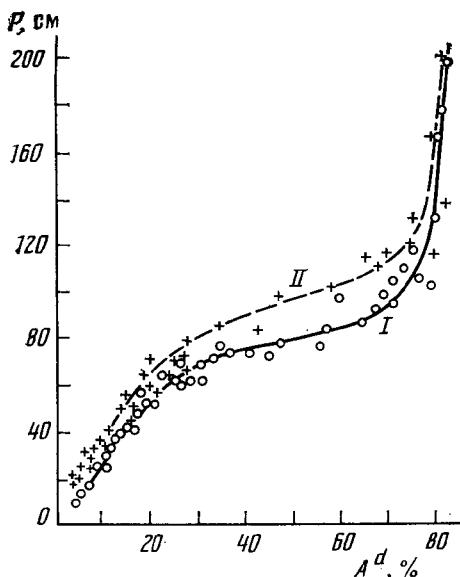


Рис. 1. Зависимость расстояния между трещинами основной (I) и второстепенной (II) систем от зольности ( $A^d$ ) углей и пород Черемховского района. Кривые построены по усредненным данным

Соотношение количества минерального и органического материала влияет, кроме того, на количество, взаимное отношение, четкость проявления и стабильность ориентировок систем, а также на морфологию трещин. В блестящих и полублестящих малозольных углях часто развиты три — четыре одинаковые, а в матовых высокозольных — две, неравнозначные системы трещин, из которых основная система представлена четкими, протяженными и выдержаными по морфологии трещинами. В блестящих углях трещины менее протяженны и менее выдержаны по ориентировке и форме, часто имеют глазковую и раковистую поверхность. Изменчивость густоты трещин в блестящих разностях наибольшая (см. табл. 3).

Степень трещиноватости углей зависит также от состава органической массы. Менее трещиноваты угли, содержащие наименьшее количество хрупких и непрочных компонентов группы витринита и наибольшее количество группы инертинита, дюренита, липоидных микрокомпонентов и сапропелевого вязкого и достаточно прочного материала. Например, в гумусовых углях Черемховского района  $P$  для трещин I и II систем в среднем составляет соответственно 40 и 50 см, а в смешанных однотипных гумусово-сапропелевых — 55 и 75 см.

Таблица 3

**Характеристика густоты трещин ( $P$ ) в углях и породах основных угледобывающих районов бассейна**

Литотип угля и породы	$P$ , см	Среднеквадратическое отклонение, см	Коэффициент вариации, %	Количество данных	$P$ , см	Среднеквадратическое отклонение, см	Коэффициент вариации, %	Количество данных
Тулун-Азейский район								
Уголь блестящий	22* 32	12 15	60 51	290	16 27	8 15	50 57	580
полублестящий	33 45	16 24	48 52	686	29 39	15 25	49 65	985
полуматовый	59 74	26 29	45 39	523	42 50	20 20	48 40	798
матовый	80 100	29 32	38 32	427	68 80	28 26	41 33	436
Углистая порода	121 130	40 49	30 38	749	86 97	36 33	41 35	516
Аргиллиты, алевролиты	135 160	44 —	30 —	202	80 93	24 —	31 —	224
Песчаники	150 165	58 64	38 39	380	105 130	41 41	39 32	684
Черемховский район								

\* Здесь и далее: в числителе — I система, в знаменателе — II система трещин.

Количественная связь степени трещиноватости угольных пачек с вещественно-петрографическим составом углей установлена на основе сравнительного анализа массовых замеров расстояний между трещинами и подсчета микрокомпонентов по аншлифам. В результате многофакторного анализа, проведенного на ЭВМ, установлено, что в малозольных ( $A^d < 30\%$ ) углях Тулун-Азейского района  $P = 1,82A^d - 1,52V_t + 145,1$ , а при  $A^d > 30\%$   $P = 0,46A^d + 0,68V_t + 1,74L + 0,32$ . Такой характер корреляционной связи обусловлен разным соотношением основных компонентов группы витринита ( $V_t$ ), липтинита ( $L$ ) и  $A^d$  в углях разной зольности. Надежность установленных зависимостей достаточно высокая — коэффициент корреляции для малозольных углей равен 0,92 при ошибке аппроксимации 0,22; для зольных — соответственно 0,82 и 0,037.

Закономерности проявления трещиноватости в углевмещающих породах также обусловлены их петрографическим составом. Например, степень трещиноватости на конкретном участке зависит от структурного типа пород, особенно при одинаковом их цементе (табл. 4). В песчаниках расстояние между трещинами, как правило, повышается по мере снижения размера породообразующих частиц. Это связано, видимо с более плотной упаковкой зерен, приводящей к упрочнению мелкозернистых пород. Подобная закономерность наблюдалась нами и в Кузбассе. Кроме того, более прочный цемент, например карбонатного состава и порового типа, также ведет к снижению интенсивности трещиноватости. Так, в песчаниках восточных районов при карбонатном цементе  $P = 85$  см, карбонатно-глинистом — 67, глинистом — 40 см.

Влияние петрографического состава на трещиноватость проявляется в зависимости густоты трещин от физико-механических свойств пород. Установлено повышение интенсивности трещиноватости с уменьшением прочности и упругости, а также с ростом хрупкости. Однако нередки случаи повышенной трещиноватости и в более прочных породах. В связи с

Месторождение	ПЕСЧАНИКИ		АЛЕВРОЛИТ
	карбонатные	глинистые	
Азейское			
Черемховское			

Рис. 2. Особенности проявления ориентировки трещиноватости в породах разного состава

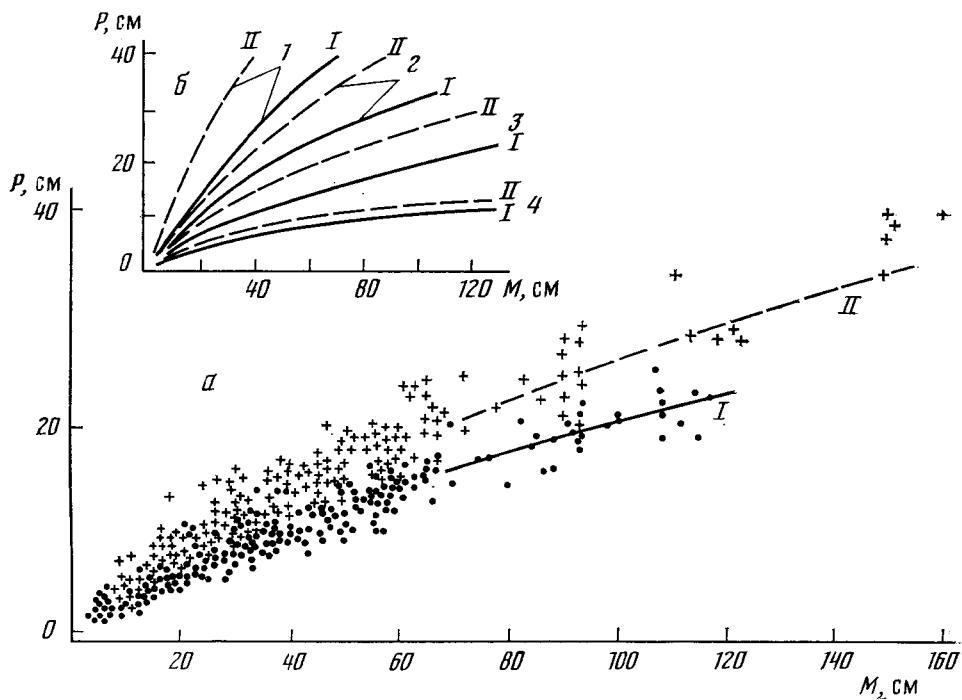


Рис. 3. Зависимость расстояния между трещинами  $P$  главных систем (I, II) от мощности пласта ( $M$ ):  $a$  — для полуматовых и полублестящих углей Черемховского района;  $b$  — обобщенные графики для углистой породы (1), матового (2), полуматового и полублестящего (3), блестящего (4) углей

тем, что не удалось получить надежную зависимость густоты трещин от прочностных и деформационных свойств, этот вопрос в целом для бассейна остается открытым.

Во вмещающих породах так же, как и в углях, в зависимости от их состава изменяется количество систем трещин, их взаимоотношение и форма образованного блока отдельности, стабильность ориентировки и морфология трещин (рис. 2). В карбонатных песчаниках развиты две одинаково четкие системы трещин, отличающиеся стабильностью ориентировки. В глинистых разностях и алевролитах увеличивается количество систем, одна из которых является преобладающей. Ориентировка трещин

Таблица 4

Расстояние между трещинами (см) в породах разного гранулометрического состава

Песчаники глинистые			Алевролиты	Аргиллиты	Месторождение, район
крупнозернистые	среднезернистые	мелкозернистые			
—	120	140—170	160	75	Азейское
	125	150—190	165	120—150	
—	105	115	90—100	75	Черемховское
	130	190	135	90	
50	40	25—75	65—105	—	Переходная зона
60	60	100	75—120	—	

внутри систем непостоянна, что отразилось на форме диаграмм (см. рис. 2).

Приведенные общие закономерности проявления трещиноватости в угольных пластах и породах, а также среднестатистические значения густоты составляют первоначальную основу общей и качественной инженерно-геологической оценки и относительного прогноза основных характеристик трещиноватости: ориентировки и густоты. Для прогнозного уточнения густоты трещин целесообразно использовать рассмотренные корреляционные связи.

С точки зрения физики деформируемого тела разбитость пласта трещинами зависит от его мощности. Это подтверждается наблюдаемым в обнажении изменением густоты трещин в однотипных породах в зависимости от мощности пластов. Массовые замеры расстояний между трещинами  $P$  и мощности  $M$  пластов (слоев), в пределах которых распространены трещины, позволили установить корреляционную связь  $P=f(M)$ , которая для разных типов углей и пород носит криволинейный характер (рис. 3). Аппроксимирующая функция в общем виде представлена выражением:  $P=aM^b$ . Величина эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$  зависит от типа пород и угля, степени метаморфизма и геотектонической характеристики района, подтверждая ранее отмеченные закономерности (табл. 5). При наибольшей степени трещиноватости коэффициенты  $a$  и  $b$  наименьшие, а графики  $P=f(M)$  занимают наиболее низкое положение (см. рис. 3).

Надежность связи  $P=f(M)$  достаточно высокая: корреляционное отношение для разных пород и углей Тулун-Азейского района равно 0,75—0,84, для Черемховского 0,70—0,94.

Зависимость  $P=f(M)$ , установленная для юрских угленосных отложений, имеет закономерный характер и распространяется также на нижнепалеозойские карбонатные и терригенные породы доюрского фундамента. Например, для пестроцветов верхнего кембрия Усть-Ордынского района она имеет вид:  $P=1,55M^{0,66}$  для главной,  $P=2,45M^{0,73}$  для второстепенной систем.

Корреляционная связь  $P=f(M)$  удобна для прогнозной оценки густоты трещин по мощности пласта, которая систематически и достаточно точно определяется по скважинам и при геологической документации горных выработок и обнажений.

Основное влияние на проявление трещиноватости оказывает структурно-тектоническое развитие участка. Наши исследования показали, что в Иркутском бассейне преобладают и повсеместно распространены трещины, нормальные к напластованию, относящиеся к литогенетическому типу. Эта трещиноватость образовалась в результате совместного проявления эндогенных постседиментационных процессов формирования гор-

Таблица 5

Коэффициенты  $a$  и  $b$  для углей и пород буроугольного Тулун-Азейского и каменноугольных Черемховского и восточных (Прииркутского, Усть-Ордынского) районов бассейна

Литотип	Тулун-Азейский район		Черемховский район		Восточные районы	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
Уголь блестящий	1,00 1,25	0,50 0,57	0,95 1,05	0,50 0,55		
полублестящий, полуматовый,шелковистый	1,40 1,47	0,60 0,66	1,20 1,26	0,60 0,66	1,20 1,25	0,60 0,68
матовый	1,70 1,72	0,71 0,81	1,58 1,60	0,64 0,73		
Углистая порода	1,78 1,80	0,78 0,86	1,60 1,75	0,72 0,81	1,60 1,70	0,68 0,70
Алевролит, песчаник глинистый	1,60 —	0,70 —	1,62 —	0,80 —	1,60 2,00	0,76 0,78
Песчаник со смешанным цементом	3,40 3,55	0,70 0,76	2,25 2,30	0,85 0,90	1,96 2,25	0,76 0,78

ных пород и тектонических движений, синхронных (сингенетических) процессам литификации. Участие эндогенных процессов в образовании литогенетической трещиноватости подтверждается расположением трещин внутри слоя (пласта) по нормали к напластованию. Влияние тектоники отразилось в ориентированности всей трещиноватости чаще всего по двум направлениям (системам), преобладании одной из систем и закономерном изменении трещиноватости на значительной площади. Типичная эндогенная трещиноватость, связанная только с внутренними процессами, подобна трещиноватости современных такыров и иногда встречается на поверхности напластования глинистых пород в виде полигональной сети реликтовых швов.

Реализация сингенетических тектонических напряжений осуществлялась в соответствии с планом деформаций периода формирования пород соответствующей толщи. При простом плане деформаций образуется простая сеть трещин, ориентированная в соответствии с траекторией главных напряжений. Преобладает система трещин, перпендикулярная направлению главных растягивающих напряжений. По мере усложнения структурно-тектонических условий этого периода усложняется сеть литогенетической трещиноватости. План сингенетической деформации в общем виде реконструируется при палеотектоническом анализе прежде всего методами анализа мощностей и построения изопахит. Взаимоотношение и конфигурация изопахит в общем виде характеризует положение главных напряжений. Прямые и параллельные изопахиты отвечают ортогональной сети напряжений. Более сложный рисунок изопахит отображает более сложное палеозалегание структур и характер сингенетической тектоники.

В результате проведенного нами сравнительного анализа рисунка изопахит и диаграмм трещиноватости для отмеченных районов Иркутского бассейна установлена закономерная зависимость количества систем трещин, их ориентировки и взаимосвязи от структурно-тектонических условий территории в период формирования юрских пород заларинской, черемховской, присаянской и кудинской свит. По отношению к палео-

Таблица 6

**О относительное распределение трещиноватости разного типа на структурах черемховского возраста**

Структурный элемент	Распределение систем трещин, %		
	продольные	поперечные	диагональные *
Крыло относительно вытянутой складки с небольшим изгибом	47	41	12
Крыло брахискладки	40	35	25
Крыло складки с поперечным изгибом	31	44	25
Замыкание складки, крыло с резким поперечным изгибом	23	42	35
Замок относительно вытянутой складки	55	29	16
Замок брахискладки	34	31	35
Замок складки с поперечным изгибом	23	46	31

\* Для удобства обобщений две диагональные системы объединены в одну группу.

структурам этого возраста выявлено распределение систем трещин различного типа.

Из табл. 6 видно, что с ростом морфогенетической сложности структурных элементов усложняется характер трещиноватости и увеличивается роль диагональных и поперечных систем. Величины относительного распределения систем трещин, полученные для юрских структур, указывают на отсутствие практически заметного количества трещин нелитогенетического происхождения. Кроме того, в связи со слабым проявлением послеюрской тектоники, особенно на платформе, и значительной ее унаследованностью в переходной зоне в уже консолидированных юрских породах новые системы трещин не образовывались, а обновлялись ранее созданные системы. Унаследованность тектонического плана неоднократно отмечалась многими исследователями [8], а также подтверждена нами при сравнительном анализе юрских и наблюдаемых структур.

В результате сравнительного анализа замеров залегания трещин и напластования юрских пород с палеозалеганием отмеченных свит, восстановленным по рисунку соответствующих изопахит, определено, что в большинстве случаев преобладает подобие наблюдаемых современных и юрских структур, а главные системы трещин прямо и однозначно связаны с существующим залеганием пластов. Эта связь проявляется в том, что на участке наблюдений основная система является продольной и наиболее интенсивной, второстепенные трещины образуют поперечную систему. В немногих случаях неунаследованного послеюрского развития структуры системы первичных трещин осложнены наложенной трещиноватостью и занимают произвольное положение относительно существующего залегания пласта. При таком сложном характере трещиноватости практикуемое прогнозирование ориентировки систем по залеганию пород является необоснованным.

Соскладчатый генезис локальной трещиноватости, установленный для юрских структур, распространяется и на большинство наблюдаемых современных структур, так как они в послеюрское время, как уже отмечалось, развивались унаследованно.

Описанные закономерности локальной трещиноватости достаточно крупных структур, отображаемых изопахитами, повторяются в более мелких структурах (рис. 4). На крыле и переклинали брахискладки (пикет 13) развиты 3—4 системы при преобладании диагональной трещино-

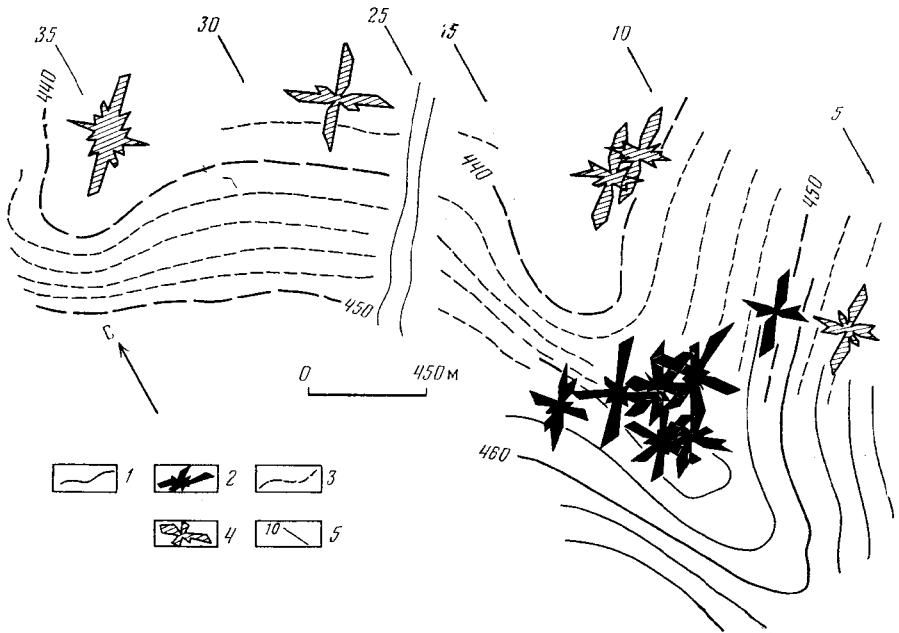


Рис. 4

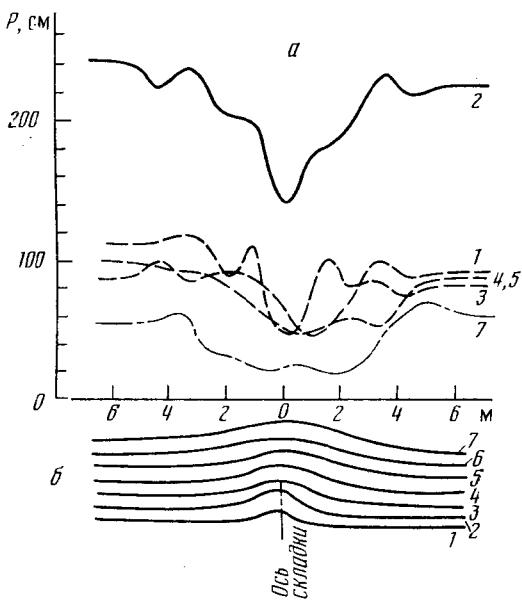


Рис. 5

ватости; в замке (пикеты 15 и 35) — системы, параллельные оси складки. Фоновая трещиноватость, представленная продольной и поперечной системами, развита на участках с моноклинальным залеганием пластов (пикеты 5, 10 и 28).

На складчатый характер локальной трещиноватости указывает зональное (относительно оси складки) изменение густоты трещин в интервале, определяемом шириной складки, а также зависимость интенсивности трещиноватости в складке от степени ее дислоцированности. Размер участка изменения густоты трещин  $P$  характеризует зону влияния складки (рис. 5). Изменение степени трещиноватости по сравнению с фоновым

Рис. 4. Проявление трещиноватости в складках сближенных угольных пластов Азейского месторождения: изоглизы и диаграммы трещиноватости Первого (1 и 2) и Второго (3 и 4) пластов; 5 — номера пикетов

Рис. 5. Графики изменения показателя густоты трещин  $P$  (а) в углях и породах с различной дислоцированностью пачек (б), сложенных полублестищими (1, 3, 4, 5), блестищим (6, 7) углями и углистыми породами (2) Черемховского месторождения

уровнем наибольшее в более дислоцированных складках. Это видно при сопоставлении, например, складки слоя 2 (рис. 5, б) и соответствующей ей кривой  $P$  (рис. 5, а) со складками и кривыми  $P$  пачек 7 или 5.

Связь относительного изменения густоты трещин и степени складчатой дислоцированности ( $\lambda, \%$ ) подтверждается и статистическими данными. Степень складчатой дислоцированности оценивалась как отношение расстояния между двумя точками, измеренного вдоль пласта, смятого в складку, к расстоянию, измеренному по прямой. Такое определение  $\lambda$  аналогично измерению деформации в физике, производимому по разнице расстояний между точками до и после деформации тела. Увеличение густоты трещин в складке относительно фонового значения ( $\Delta P, \%$ ) зависит от  $\lambda$  для складок подобных примеру (рис. 5) следующим образом:

$\lambda$	...	1	2	4	6	8
$\Delta P$	...	12	25	45	55	60

Влияние разрывных дислокаций (дизъюнктивов) проявляется в изменении густоты трещин и возникновении новых содизъюнктивных систем, параллельных смесяителю и сочленяющихся с ним под углом. Величина зоны таких изменений возле смесяителя зависит от типа смещения и его амплитуды. Например, для сбросов, типичных для платформенных районов бассейна, получена следующая зависимость ширины зоны изменений  $P$  в крае от амплитуды:

амплитуда, м	...	0,1	0,15	0,6	0,8	1,2
ширина зоны, м	...	0,25	0,5	1,5	2,5	3,6

Таким образом, эти примеры показывают, что по величине показателей складчатой или разрывной деформации можно вести прогнозную оценку интенсивности локальной трещиноватости.

Для прогнозной оценки интенсивности трещиноватости интересны примеры ритмического изменения густоты трещин, установленного в Тулун-Азейском и Черемховском районах в горизонтальных пластах при постоянном петрографическом составе породы. Регистрограмма изменения  $P$  протяженных участков имеет симметрично волновую форму (рис. 6). Эта закономерность описывается функцией:  $P = A \sin(L\omega) + A_0$ , где  $L$  — расстояние, м;  $A$  — амплитуда синусоиды, соответствующая отклонению наибольшего и наименьшего значений  $P$  от среднего  $P = A_0$ , см;  $\omega = \pi/B$  — периодичность изменения  $P$ ,  $2B$  — длина волны, м;  $\sin(L\omega)$ , рад. Периодичность и величина колебания зависят от литотипа углей и пород, степень их метаморфизма, что иллюстрируется значениями параметров аппроксимирующей функции в табл. 7. Надежность аппроксимации подтверждена с помощью критерия Пирсона. В нашем примере показатель надежности равен 0,62, что превышает уровень достаточной надежности, равный 0,05.

Установленная закономерность и ее математическое описание позволяют по результатам измерения  $P$  в конкретном пункте определять расстояние до ближайшего участка с экстремальным значением густоты трещин, а также величину ее колебания.

В заключение отметим, что прогнозирование главных показателей трещиноватости — ориентировки и интенсивности — основывается на знании геологических аспектов происхождения и закономерностей проявления трещиноватости, которые зависят от состава пород и угля, их степени метаморфизма и тектонической структуры района. Основная, повсеместно развитая в регионе трещиноватость относится к литогенетическому типу и является результатом одновременной реализации напряжений, вызванных процессами литификации отложений и сингенетической тектоники. Планом сингенетической тектоники определяется пространствен-

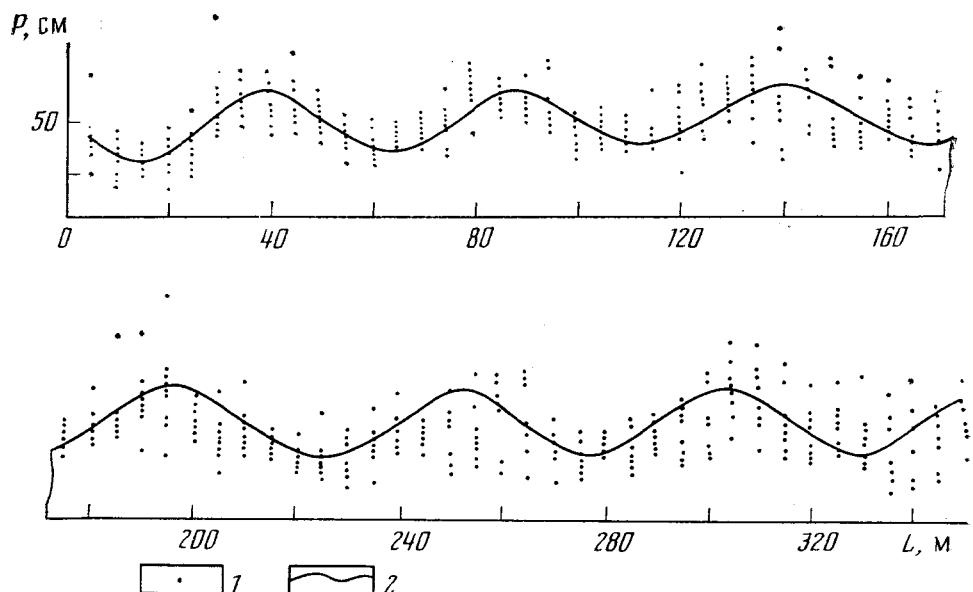


Рис. 6. Периодичность изменения показателя густоты  $P$  в рабочем угольном пласте Тулунского карьера на участке длиной  $L=350$  м; 1 — значения  $P$  для различных пачек однотипных углей, 2 — аппроксимирующая функция

ное положение, количество и взаимоотношение систем трещин. Этот план в общем виде реставрируется методом построения изопахит, применяемом при палеотектоническом анализе. Закономерное соотношение систем трещин разного типа с изопахитами и их количественное распределение дают возможность вести прогнозирование ориентировки систем по рисунку изопахит. Эта связь трещиноватости с юрскими структурами распространяется и на существующие складки, которые развивались унаследованно в послеюрское время. При неунаследованном, произвольном развитии структур формируется сложная сеть трещиноватости в связи с наложением новых трещин на ранее образованные системы. При таких условиях способ прогнозирования основных систем трещин по наблюдаемому залеганию пластов не обоснован. Для складчато-разрывных дислокаций уст-

Таблица 7

Параметры синусоидального колебания густоты трещин для главных (I, II) систем

Литотип угля и пород	$A$ , см	$2B$ , м	$A_0$ , см
Тулун-Азейский район			
Уголь	$\frac{15}{20-25}$	$\frac{52}{70}$	$\frac{50}{60}$
Углистая порода	$\frac{—}{35}$	$\frac{—}{245}$	$\frac{—}{125}$
Алевролит	$\frac{—}{35-50}$	$\frac{—}{280-300}$	$\frac{—}{160}$
Черемховский район			
Уголь полублестящий	$\frac{10}{—}$	$\frac{40}{—}$	$\frac{30}{—}$
Уголь полуматовый	$\frac{12}{—}$	$\frac{40-45}{—}$	$\frac{35}{—}$

новлена зависимость зоны повышенной трещиноватости и величины изменения густоты от степени складчатой дислоцированности и амплитуды смещения. Используя показатели степени складчатости или разрывной деформации, можно вести прогнозную оценку важных характеристик локальной трещиноватости, связанных с ее зональностью.

Практическую направленность имеют корреляционные связи интенсивности трещиноватости с такими геологическими факторами, как мощность пласта и основной состав, которые систематически и достаточно точно определяются по скважинам и геологической документации выработок.

В случаях ритмического изменения густоты трещин прогноз важных в инженерно-геологическом отношении характеристик, а именно расстояния до ближайшего участка и величина экстремального значения интенсивности, осуществляется достаточно просто, например с использованием аппроксимирующей синусоидальной функции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аммосов И. И., Еремин И. В. Трещиноватость углей. М.: Изд-во АН СССР. 1960. 110 с.
2. Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники. М.: Госгеолтехиздат. 1954. 606 с.
3. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
4. Иванов Г. А. Кливаж (отдельности) в углях и вмещающих породах и пути его практического использования. М.—Л.: ГОНТИ, 1939. 107 с.
5. Новикова А. С. О трещиноватости осадочных пород восточной части Русской платформы//Изв. АН СССР. Сер. геол. 1951. № 5. С. 68—85.
6. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 160 с.
7. Складчатые деформации земной коры, их типы и механизм образования. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 335 с.
8. Юрские континентальные отложения юга Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 321 с.

ВНИМИ

Поступила в редакцию  
9.I.1986,

УДК 624.131

МАРКАРЬЯН В. В.

**ОПЫТ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕЙ  
ПО КРИТИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ В МАЙКОПСКИХ  
ГЛИНАХ АБХАЗИИ**

В последнее двадцатилетие наметился перспективный подход к прогнозу времени образования оползней и обрушения откосов, основанный на характеристиках ползучести — разрушения. Речь идет о расчетах времени возникновения быстрых («лавинных») перемещений на склоне или откосе после достижения критической скорости или накопления суммарной разрушающей деформации [2, 6].

Подобные расчеты у нас в стране и за рубежом применялись главным образом для краткосрочных (до года) прогнозов и дали неплохие результаты. М. Сайто [6] сопоставил прогнозные и фактические данные о разрушении склонов в Японии. Для четырех из шести склонов, по которым давался прогноз, расхождение прогнозного и фактического времени до разрушения составило от 6 мин до 4 ч (заблаговременность прогнозов от 2 до 6 мес). В двух случаях медленные деформации стабилизировались без разрушения склона. Приведенные результаты свидетельствуют о достаточно высоком качестве прогнозов.

У нас в стране метод расчета по критическим скоростям успешно применяли С. С. Вялов и Г. Н. Бондаренко [1] для прогноза времени разрушения откосов на комбинате «Аппатит», а также А. И. Могилко и В. П. Ильченко (УКРНИИпроект) для откосов Новодмитровского месторождения (монтмориллонитовые и углистые глины) и склонов Среднего Приднепровья (лесссы) [4].

Вместе с тем до последнего времени отсутствовал опыт долгосрочного прогноза времени разрушения склонов по критическим деформациям, хотя задача эта несомненно актуальна. Первые результаты ее решения получены на оползневых склонах Черноморского побережья Абхазии, сложенных майкопскими глинами [3]. На базе существующих представлений реологии и механики грунтов разработан и опробован в натурных условиях метод прогноза времени оползневого разрушения склонов с многолетней заблаговременностью.

Как известно, процесс ползучести условно подразделяется на три стадии: первая — неустановившейся (первичной) ползучести, в течение которой деформации развиваются с уменьшающейся скоростью; вторая — установившейся (вторичной) ползучести, когда скорость деформации, достигнув минимального значения, становится постоянной; и наконец, третья — прогрессирующей (третичной) ползучести с увеличивающейся скоростью деформирования. На первом, относительно длительном этапе третьей стадии пластическая деформация еще не вызывает собственно разрушения. Второй этап связан с интенсивным развитием трещин и катастрофически быстрым нарастанием деформации, приводящим к разрушению. Третью стадию ползучести иногда называют стадией разрушения.

В качестве критерия разрушения грунта в результате сдвиговой ползучести предложено [2] принимать достижение деформацией критического значения

$$\varepsilon = \varepsilon_k = \text{const.} \quad (1)$$

На стадии установившейся ползучести деформацию в любой момент времени можно выразить через ее скорость  $\dot{\varepsilon} = \varepsilon t$ . В момент разрушения  $t = t_p$  деформация будет равна  $\varepsilon_k = \varepsilon t_p$ , откуда время до разрушения

$$t_p = \frac{\varepsilon_k}{\dot{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_k$  — критическая относительная деформация при разрушении.  $\dot{\varepsilon}$  — скорость относительной деформации.

Именно зависимость (2) в измененном виде и применили М. Сaitо, С. С. Вялов и др. [2, 6, 7] для краткосрочных прогнозов времени разрушения склонов и откосов, полагая на основании экспериментальных данных и немногочисленных натурных наблюдений, что  $\varepsilon_k$  является универсальной константой данного грунта, а ее значение не зависит от скорости деформирования и величины действующих напряжений<sup>1</sup>.

Для ясности дальнейшего изложения необходимо уточнить содержание понятия «разрушение склонов». Для грунтов разрушение должно быть определено как окончательное и макроскопическое состояние разъединения. Конечным результатом разрушения массива склона следует считать образование оползневых трещин, замкнутых на поверхности склона и разделяющих отделившиеся оползневые блоки.

Практически во всех опытах по разрушению откосов [5] и во многих случаях наблюдений на оползневых склонах [3] разрушение наступало через несколько часов после лавинного увеличения скорости перемещений. Разрушению предшествовал длительный (месяцы, годы) процесс трещинообразования и медленных деформаций.

В случае прогноза оползней важно предсказать именно начало лавинного ускорения перемещений, которое условно можно принять за исходный «момент» разрушения. Полагая, что ускорение перемещений является следствием накопления критической плотности дефектов структуры грунта (критической линейной деформации), время до разрушения может быть рассчитано исходя из установленной многолетней скорости ползучести. При этом с достаточной для практических целей точностью можно считать, что скорость ползучести до «момента», непосредственно приближенного к разрушению, почти не зависит от скорости подрезки основания склона.

Для вывода расчетной формулы условие (2) перехода к скорости абсолютной деформации ползучести на оползневом склоне  $\gamma$  можно записать в следующем виде:

$$\frac{\dot{\gamma}}{L} t_p = \varepsilon_k, \quad (3)$$

где  $t_p$  — время от начала возникновения ползучести до разрушения,  $L$  — длина поверхности смещения формирующегося оползня. Запишем выражение (3) для «момента» разрушения:

$$\dot{\gamma} t_p = \varepsilon_k (L_0 - l t_p), \quad (4)$$

где  $L_0$  — первоначальная длина поверхности смещения,  $l$  — скорость уменьшения длины поверхности смещения (например, в результате абразионного размыва), откуда:

$$t_p = \frac{L_0 \varepsilon_k}{\dot{\gamma} + l \varepsilon_k}. \quad (5)$$

Прогнозируемое время (образования оползня)  $t_p'$  отсчитывается от начала наблюдений, когда измерены расчетные параметры  $\dot{\gamma}, l$ :

$$t_p' = t_p - t_i, \quad (6)$$

<sup>1</sup> М. Сaitо считает, что  $\varepsilon_k$  не зависит также и от типа грунта [5].

где  $t_1$  — время от начала возникновения ползучести до начала наблюдений.

Выразим  $t_1$  через суммарную деформацию  $f$ , имевшую место до начала наблюдений:

$$t_1 = \frac{f}{\dot{\gamma}}. \quad (7)$$

Подставляя  $t_p$  и  $t_1$  в (6) и полагая  $L_0 = L_{ii} + l \frac{f}{\dot{\gamma}}$ , где  $L_{ii}$  — длина поверхности смещения, измеренная в начале наблюдений, после преобразований получили расчетную формулу для прогноза времени оползневого разрушения:

$$t_p = \frac{L_{ii}\varepsilon_k - f}{l\varepsilon_k + \dot{\gamma}}. \quad (8)$$

Формула (8) применялась для прогноза времени образования оползней в майкопских отложениях Абхазского побережья Черного моря [3].

Майкопские отложения обладают рядом особенностей, благоприятствующих развитию оползневого процесса: слоистой текстурой, обусловливающей анизотропию свойств переуплотненных глин; быстрой выветриваемостью в условиях естественных обнажений; низкой водопрочностью поверхностных отложений, предрасположенностью их к набуханию и усадке, тенденцией к пластическим деформациям. На Черноморском побережье Абхазии развитию оползней способствуют также региональные

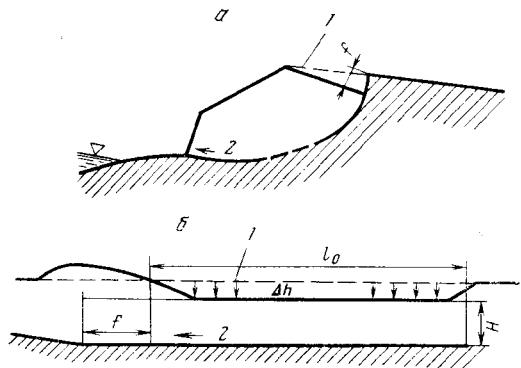


Рис. 1

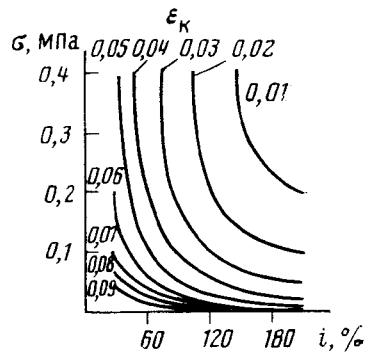


Рис. 2

Рис. 1. Схемы механизма образования оползня для приближенного расчета суммарной деформации, имевшей место до исходного момента прогноза: а — в нижней части подмываемого склона (блоковый оползень); б — в средней части склона (оползень-поток). 1 — первоначальная поверхность склона; 2 — поверхность (зона) смещения;  $l_0$  — длина зоны осадки;  $f$  — суммарная деформация;  $\Delta h$  — осадка поверхности;  $H$  — мощность пластической области

Рис. 2. Номограмма для определения  $\varepsilon_k$  поверхностных отложений

геологические условия: высокая степень тектонической трещиноватости, расчлененный рельеф, активное проявление абразии и эрозии. В рассматриваемом районе отмечено около 150 активных оползней, занимающих 5% территории площадью 52 км<sup>2</sup>.

Численные значения параметров  $L_{ii}$ ,  $l$ ,  $\dot{\gamma}$  получали на объектах прогноза в результате прямых измерений и расчетов по данным стационарных наблюдений. Величина суммарной деформации  $f$ , имевшей место до начала наблюдений, определялась прямыми измерениями или расчетом. В каждом случае необходимо было выбрать одну из двух принципиально возможных схем механизма образования оползня (рис. 1): на активно-

**Результаты определения критических деформаций при разрушении майкопских глин в опытах на сдвиг**

Схема испытаний (при внешнем давлении 0,2–0,3 МПа)	Относительная деформация при разрушении	Количество опытов
По напластованию	0,01	6
Поперек напластования	0,06	4
По тектонической трещине	0,02	3
По старой поверхности смещения	0,04	3

подмываемом уступе (преимущественно блоковые оползни), в средней части склона (преимущественно оползни-потоки). В первом варианте  $\varepsilon_k$  измеряется как амплитуда опускания крыла трещины растяжения, ограничивающей потенциальный оползневой участок. В процессе формирования оползня по второй схеме происходит отток материала из зоны сдвига, уменьшение мощности пластической области (мощности формирующегося оползня) в результате осадки и некоторого увеличения ее длины по склону, т. е. происходит как бы растяжение пластической области. В связи с этим имевшая место деформация  $f$ , соответствующая величине растяжения, рассчитывается по осадке поверхности  $\Delta h$ , исходя из относительного удлинения пластической области:

$$f = l_0 \frac{\Delta h}{H}, \quad (9)$$

где  $l_0$  — длина зоны осадки,  $H$  — мощность пластической области.

Величина критической деформации  $\varepsilon_k$  определялась в опытах на сдвиг на приборе одноосного сдвига ВСВ-25, в шурфах — на сдвиговой установке с диаметром целиков от 220 до 450 мм и по результатам наблюдений за смещением небольших оползневых блоков на активно подмываемых участках береговых уступов. Оценка масштабного эффекта показала, что относительная величина  $\varepsilon_k$  практически не зависит от длины поверхности сдвига (в интервале 0,05—25 м). Эксперименты, выполненные на майкопских глинах, подтвердили выводы М. Сaito и др. [2, 6], что критическая деформация характеризуется одной и той же величиной при разных скоростях деформирования. Вместе с тем установлено, что  $\varepsilon_k$  литефицированных майкопских глин зависит от структурно-литологических особенностей толщи, в которой формируется поверхность смещения (таблица). Величина критической деформации поверхностных отложений (оползневых, элювиальных) на майкопских глинах (рис. 2) изменяется в зависимости от внешнего давления на уровне зоны сдвига ( $\sigma$ ) и отношения ее мощности к среднему диаметру структурных элементов породы ( $i$ ). В условиях, когда мощность зоны сдвига устанавливается больше двух диаметров мезоагрегатов<sup>2</sup>,  $\varepsilon_k$  зависит только от внешнего давления, т. е. от глубины залегания поверхности смещения.

Полагая, что условие (8) достаточно правильно отражает механизм разрушения, можно оценить ошибку предсказания времени разрушения в зависимости от ошибок измерений параметров, входящих в это условие. Путем дифференцирования выражения (8) и последующих преобразований получена формула для оценки относительной среднеквадратичной ошибки предсказания времени разрушения:

$$M_p = \pm \sqrt{\frac{m_L^2 \varepsilon_k^2 + m_e^2 L^2 + m_f^2}{(L \varepsilon_k + f)^2} + \frac{m_l^2 \varepsilon_k + m_g^2 \gamma^2 + m_i^2}{(\gamma \varepsilon_k + l)^2}}, \quad (10)$$

<sup>2</sup> Подобное соотношение типично для оползней, формирующихся в поверхностных отложениях. Средний диаметр мезоагрегатов поверхностных отложений 3—5 мм, тогда как мощность зоны сдвига в большинстве случаев на порядок больше.

где  $m_L$ ,  $m_e$ ,  $m_f$ ,  $m_t$ ,  $m_l$  — абсолютные среднеквадратичные ошибки измеряемых параметров.

Приняты следующие численные значения ошибок по опыту проводившихся измерений:  $m_L = \pm 1$  м;  $m_e = \pm 0,001$  м;  $m_f = \pm 0,1$  м;  $m_t = \pm 0,1$  м/год;  $m_l = \pm 0,01$  м/год.

Проверка формулы (8) применительно к оползневому разрушению майкопских глин проводилась на участках активно абрацируемых крутих склонов, где периодически формируются небольшие блоковые оползни. Для 15 таких случаев (рис. 3) время от возникновения ползучести до разрушения, рассчитанное по формуле (8), отклонялось от фактического не более чем на 25%, что находится в пределах допустимой ошибки, рассчитанной по выражению (10).

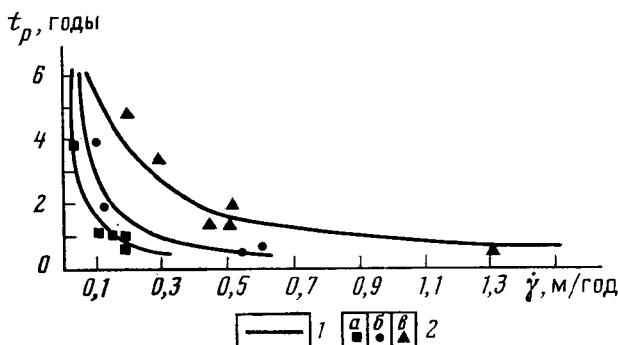


Рис. 3. Сравнение результатов прогноза времени образования оползней  $t_p$  с данными наблюдений: 1 — прогноз; 2 — результаты наблюдений: а —  $L = 5$  м,  $l = 0,1$  м/год; б —  $L = 10$  м,  $l = 0,2$  м/год; в —  $L = 25$  м,  $l = 0,5$  м/год;  $f = 0$  во всех случаях

В заключение необходимо отметить, что разработанный ранее метод прогноза времени образования оползней и обрушения откосов, основанный на характеристиках критических скоростей деформаций, усовершенствован применительно к долговременным прогнозам. Прогноз осуществляется расчетом времени накопления суммарной критической деформации. Проверка расчетной формулы показала удовлетворительное совпадение прогнозных и наблюдавшихся данных. Вместе с тем объем фактического материала, использованного для оценки оправдываемости прогнозов, пока невелик, поэтому предложенный метод нуждается в дальнейшей проверке на разнообразных оползневых склонах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов С. С., Бондаренко Г. И. Прогнозирование времени до обрушения откосов мерзлых пород.— Тр. II Всесоюз. симп. по реологии грунтов. Ереван, 1976, с. 143—151.
2. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. Маркарьян В. В. Исследование и прогноз оползневого процесса в майкопских отложениях (на примере оползневых районов Абхазии): Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. геол.-мин. наук. М., 1984. 20 с.
4. Могилко А. И., Ильченко В. П. О взаимосвязи ползучести и длительной прочности глинистых пород.— Пробл. гидрогеол. и инж. грунтоведения, 1975, № 4, с. 15—17.
5. Сaito M. O., Уезава Х. Разрушение грунтов в результате ползучести.— В сб.: Механ. грунтов и фундаментостроение. Тр. Междунар. конф. М.: Стройиздат, 1966, с. 96—104.
6. Сaito M. O. Фактический анализ случаев предсказания обрушения склонов.— Проблемы геомеханики, 1982, № 8, с. 45—74.
7. Шукле П. Реологические проблемы механики грунтов. М.: Стройиздат, 1976. 360 с.

ВСЕГИНГЕО

Поступила в редакцию  
17.II.1986

УДК 624.131

МОНОСТИРНАЯ Т. А., ГУТКОВСКИЙ В. Н.

**ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ  
СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ  
БАЛАНСОМ РЕЛЬЕФА**

Рассматривая геологические процессы с точки зрения совершающей ими работы по транзиту минерального материала, появляется возможность дать единую энергетическую оценку их совокупного действия. При этом изменение потенциальной энергии рельефа в гравитационном поле Земли ( $\Delta E_p$ ) должно быть равно алгебраической сумме энергий эндогенных (неотектонических) и экзогенных геологических процессов

$$\Delta E_p = E_{\text{энд}} + E_{\text{экз.}} \quad (1)$$

Исходная формула для определения энергии  $i$ -го геологического процесса имеет вид

$$E_i = m_i g \Delta h_i, \quad (2)$$

где  $E_i$  — энергия  $i$ -го геологического процесса, Дж;  $m_i$  — масса транспортируемого им минерального материала, кг;  $\Delta h_i$  — изменение высоты ее центра тяжести, м;  $g$  — гравитационная постоянная, Н/м.

В приходную часть энергетического баланса (1) войдет механическая энергия тех геологических процессов, которые увеличивают потенциальную энергию рельефа территории, а в расходную — механическая энергия процессов, поникающих ее [2].

Согласно проведенным расчетам, прямое влияние современных тектонических движений на изменение энергетического баланса рельефа относительно мало. Их энергия составляет не более 0,001% от суммарной энергии экзогенных геологических процессов (ЭГП). Косвенное влияние неотектоники, осуществляющее через процессы эрозии и абразии, учитывается при определении их энергии. Следовательно, сумма энергий ЭГП определяет направление и скорость развития рельефа, что позволяет оценить его устойчивость и степень оползнеопасности. Путем сравнения энергий различных ЭГП можно выделить среди них определяющий.

Геолого-геоморфологическое строение склонов также следует анализировать с точки зрения работы, понимая под работой реакцию массива горных пород на воздействие оползнеобразующих факторов. В этом аспекте для характеристики оползневых склонов лучше всего пользоваться структурно-геодинамическими типами оползней, выделенными Одесской инженерно-геологической партией п/о «Крымгеология» на основе разработанной А. М. Дранниковым классификации одесских оползней [1] и с учетом классификационных признаков, предложенных Ф. В. Котловым [3]. Выделено четыре типа оползней [4]:

I тип — оползни-потоки в лёссовидных породах четвертичного возраста, вызванные переувлажнением;

II тип — блоковые оползневые смещения лёссовидных пород четвертичного возраста по нижнечетвертичным и плиоценовым глинам, переходящие в своем дальнейшем развитии в оползни-потоки;

III тип — блоковые оползни, которым подвержена вся неоген-четвертичная толща, залегающая выше уровня моря; они вызывают, как правило, неглубокие деформации в меотических отложениях;

**Характеристика элементов районирования северо-западного Причерноморья**

Тип участка	Подтип участка	Характеристика участков	
		Сумма энергий ЭГП, МДж/км <sup>2</sup>	Типы оползней
1	1.1	—80 — 100	III, реже II
	2.1		I, реже II
	2.2		III и II, реже I
2	2.3	—100 — 120	II и I
	2.4		II, редко III
	2.5		Древние оползни III типа без современной активизации
3	3.1	—120 — 200	I, реже II
4	4.1	—200 — 250	II и III
	4.2		III, реже II и I
5	5.1	—250 — 300	III, реже II
	5.2		II, реже III
6	6.1	—300 — 350	II и I
	6.2		II, редко III
7	7.1	—350 — 500	III, редко II
	7.2		Древние оползни III типа с современной активизацией
8	8.1	—500 — 2000	III, реже II и I
	8.2		III, редко II
9	9.1	—2000 — 3000	III, редко II
	9.2		III и II, редко I
10	10.1	—3000 — 4000	IV, III, редко II и I
11	11.1	—4000 — 5000	IV, III, редко II и I
	11.2		III
12	12.1	Не подсчитывался	Оползни практически не развиваются

IV тип — блоковые оползневые смещения, глубоко деформирующие меотические породы, с поверхностью смещения, расположенной существенно (на 10—15 м) ниже современного уровня моря.

Такой подход позволил ввести относительную унификацию при типизации оползнеопасных территорий и произвести типологическое районирование (таблица и рис. 1). При этом наиболее крупные таксономические единицы — типы выделены по величине суммы энергий ЭГП, а подтипы — по литолого-геодинамическим типам оползней. В результате получено 12 типов участков, из них 11 оползневых, которые подразделены на 22 подтипа. В отдельный 12 тип объединены участки, где оползни практически отсутствуют. Сумма энергий ЭГП для них не подсчитывалась. На остальной территории она имеет отрицательный знак, что указывает на уменьшение потенциальной гравитационной энергии существующего рельефа за счет его разрушения экзогенными геологическими процессами.

В северной и центральной частях изученной территории, для которых характерна более высокая энергия рельефа и соответственно значительно большая его расчлененность, денудация происходит в основном за счет эрозии. Работа оползневого разрушения здесь имеет подчиненное значение. Оползни обычно неглубокие и небольшие по площади. Это означает, что рельеф здесь находится в относительно устойчивом состоянии. Он еще не подготовлен эрозионными процессами для оползневой денудации (не сформировались соответствующие геоморфологические условия).

На морском побережье вследствие интенсивной абразионной деятельности происходит активное переформирование склонов. В результате энер-

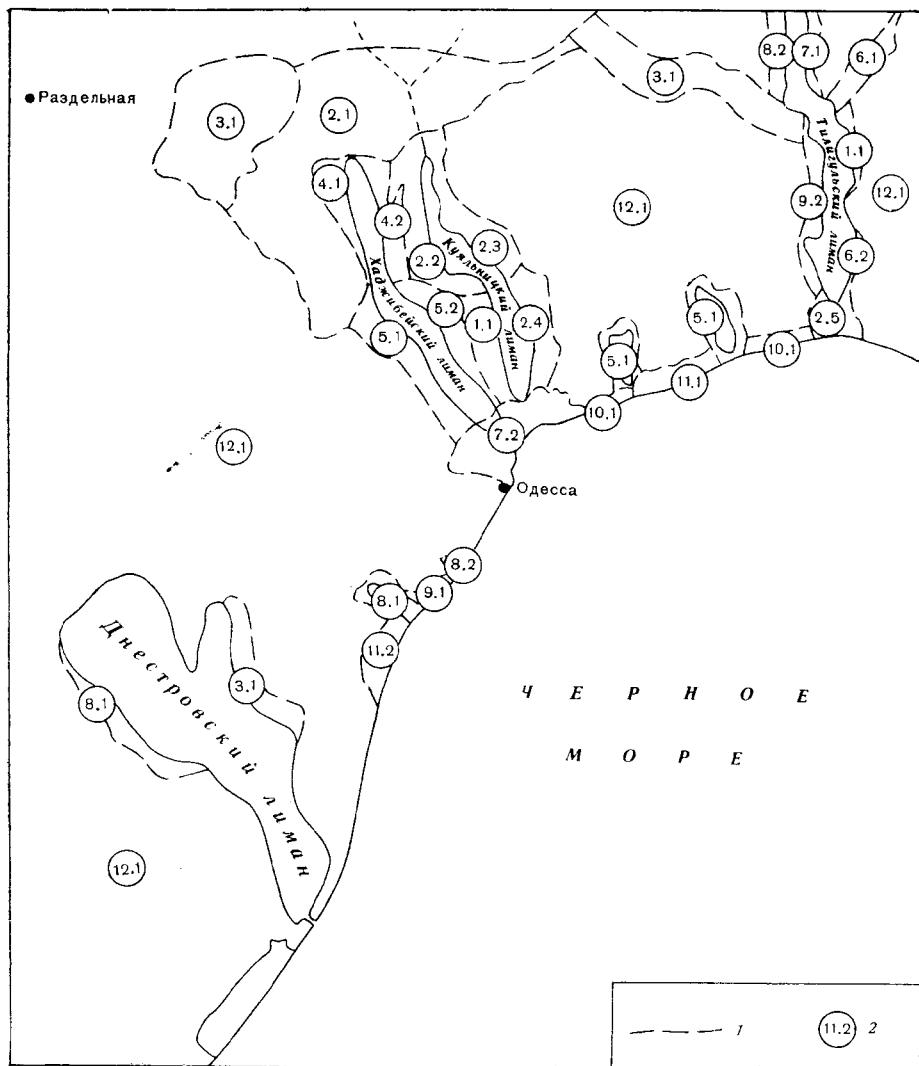


Рис. 1. Схематическая карта районирования северо-западного Причерноморья по сумме энергий ЭГП с учетом типов оползней: 1 — границы участков; 2 — подтипы участков

гия оползневых подвижек увеличивается в десятки и сотни раз. Энергия эрозии снижается, что обусловлено меньшим запасом гравитационной энергии рельефа и соответственно меньшей его расчлененностью. Тем не менее, суммарная энергия ЭГП, а следовательно, и скорость разрушения рельефа значительно возрастает за счет энергии абразии и вызванных ею оползней.

Отдельно следует рассмотреть правобережья крупных лиманов: Днестровского и Тилигульского. Эти участки являются как бы промежуточными между описанными выше двумя группами. Денудация здесь происходит в основном за счет оползней на фоне достаточно активной эрозионной деятельности. Ее энергия превышает энергию абразии, что приближает эти участки к первой группе.

Таким образом, в направлении с севера на юг возрастает суммарная энергия ЭГП, а значит, и скорость денудации при одновременном уменьшении энергетического запаса рельефа. При этом в зоне прибрежных склонов наблюдается резкое, скачкообразное изменение всех энергети-

ческих показателей: энергетические градиенты изменяются от 3—4 МДж/км для энергии ЭГП и  $1 \cdot 10^5$  МДж/км для гравитационной энергии рельефа до 12 и  $6 \cdot 10^5$  МДж/км соответственно в основном за счет абразии, которая обусловила резкое переформирование склонов, приведшее к активизации оползневых процессов.

Более детально энергетический баланс прибрежных склонов изучен на Сычавском опорном участке, где произведен его анализ за 11 лет наблюдений с 1973 по 1984 г. В результате установлено, что наиболее значительная часть энергии волнения расходуется на работу по размыву берегового обрыва в процессе абразии и на вынос наносов из прибрежной зоны. Энергетические затраты на аккумуляцию имеют подчиненное значение. Вследствие этого происходит постоянное увеличение общей крутизны склона и снижение его устойчивости во времени, что и вызывает периодическую активизацию оползневых процессов. Энергия этих процессов в изучаемый период была весьма незначительна — на 2—3 порядка ниже энергии абразии. Такое соотношение в целом свидетельствует о том, что прибрежный склон еще не достиг критического состояния и находится в стадии подготовки оползня. В результате подмыва основания склона в процессе абразии происходит концентрация потенциальной энергии в верхней части склона, что и ведет к снижению его устойчивости. Этот процесс, однако, протекает по-разному в различных частях оползня — единой динамической системы.

По морфологии и динамике здесь можно выделить три расчетных участка: юго-западный, центральный и северо-восточный. Для каждого из них произведено графическое сопоставление временного распределения энергии абразионного и оползневого процессов (рис. 2). Их анализ показал следующее.

На юго-западном участке происходили незначительные изменения энергии оползневого движения вне зависимости от изменений энергии абразии, что может свидетельствовать об относительно устойчивом состоянии указанной части оползневого склона.

С другой стороны, наиболее высокий северо-восточный участок склона даже на относительно небольшое (по сравнению с юго-западным участком) увеличение энергии абразии реагирует значительной активизацией оползневых подвижек. Следовательно, склон здесь находится в неустойчивом состоянии. Этот вывод подтверждают и визуальные наблюдения на склоне: в центральной части этого участка, в 10—15 м от бровки появилась крупная продольная трещина закола длиной до 90 м. На других участках подобные трещины отсутствуют.

В пределах центрального участка оползневой склон характеризуется минимальной шириной при средней высоте. Рассматриваемые ЭГП протекают здесь наиболее интенсивно. Наблюдается синхронное изменение их энергии и даже некоторая инерционность в нарастании энергии оползневого процесса по отношению к энергии абразии (1978—1979 гг.), что привело к зафиксированному нами местному нарушению устойчивости склона. В последующие годы наблюдалось значительное снижение энергии абразии и оползневых подвижек, причем этот процесс носит несинхронный характер. Развитие здесь оползневых деформаций, по-видимому, будет зависеть от аналогичных событий на северо-восточном участке.

Можно предположить, что имеющая место относительная неоднородность в развитии оползня сохранится до момента достижения склоном предельного состояния.

## Выводы

1. Наиболее общей характерной чертой развития природной геологической системы, а следовательно, и оползней, которые с определенной условностью можно рассматривать как ее конечное результирующее действие, является изменение ее энергетического баланса.

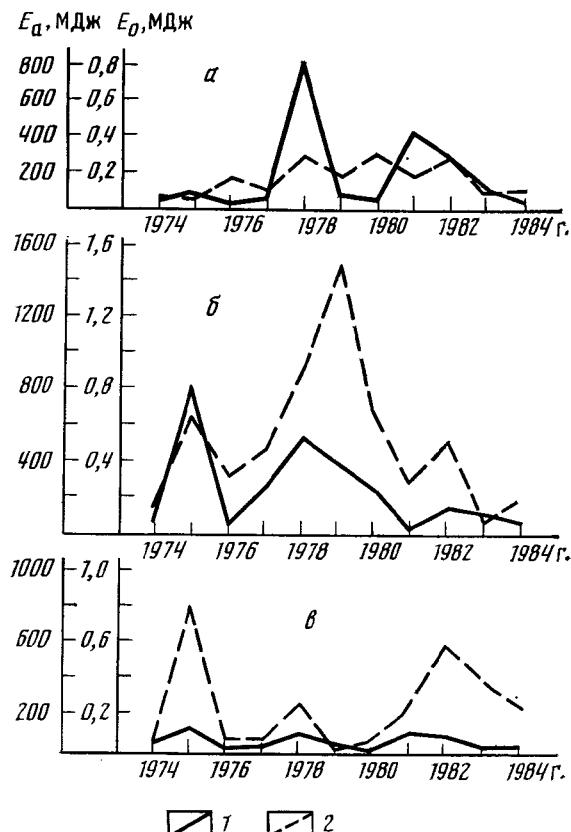


Рис. 2. Изменение во времени энергии абразионных ( $E_a$ ) и оползневых ( $E_o$ ) процессов на Сычавском оползневом склоне: *а* — на юго-западном расчетном участке; *б* — на центральном; *в* — на северо-восточном расчетном участке; 1 — энергия абразии; 2 — энергия оползневых подвижек

2. Прямое влияние современных тектонических движений на изменение энергетического баланса рельефа северо-западного Причерноморья относительно мало (0,001% от суммарной энергии ЭГП).

3. По знаку и величине суммы энергий ЭГП можно судить соответственно о направлении и скорости изменения рельефа, а также о степени его оползнеопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дранников А. М. Генеральная схема противооползневых мероприятий г. Одессы. Одесса, 1940. С. 74—76.
2. Епифан В. К. Энергетический баланс геодинамики района//Тр. I-й Всесоюз. конф. по инженерной геологии. Тбилиси, 1978. Т. 2. Ч. I. С. 222—230.
3. Котлов Ф. В. Типы одесских оползней, условия и факторы их образования//Тр. ПНИИС. Т. VII. М., 1971. С. 28—30.
4. Оползни Черноморского побережья Украины/Под ред. Лужецкого А. Н. М.: Недра, 1977. С. 65—74.

Причерноморская геологоразведочная экспедиция производственного объединения «Крымгеология»

Поступила в редакцию  
5.II.1986

УДК 624.131

ГРИБАНОВА Л. П., БАБАК В. В., ЗАЙЦЕВ А. С.,  
УСТИНОВА З. Г., ЛОМОВ В. Ф.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ СКЛАДИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Промышленные и бытовые отходы в настоящее время являются одним из основных источников загрязнения всех компонентов природной среды. Как свидетельствует отечественный и зарубежный опыт, [4, 7, 9, 10], наряду с изменением химизма подземных вод, загрязнением атмосферы, почв и поверхностных водотоков, в районах размещения отходов происходят изменения структуры, водно-физических и механических свойств грунтов (в частности, изменение проницаемости и прочности) вследствие кольматажа и цементации пород, выщелачивания, изменения коллоидных свойств глин под влиянием электролитов и др.

Размеры и характер ореолов загрязнения и изменения свойств пород в большой степени зависят от устойчивости геологической среды в целом к техногенному воздействию и защищенности отдельных ее компонентов, определяемой комплексом почвенных и геолого-гидрогеологических условий. Проблема адекватной оценки этих условий применительно к задачам складирования отходов чрезвычайно актуальна, в особенности для крупных городов. Количество бытовых и промышленных отходов непрерывно растет, в связи с чем сроки функционирования полигонов (свалок) сокращаются, а количество их увеличивается. Расширение старых и создание новых полигонов требует знания фактических величин ореолов загрязнения и изменения геологической среды; нельзя признать удовлетворительным существующее требование СНиП II-60-75\* [6] о назначении санитарно-защитной зоны свалок шириной 500 м. Недостаточны и требования ведомственных инструкций к выбору мест складирования отходов [2, 5].

Центральная инженерно-геологическая и гидрогеологическая экспедиция (ЦИГГЭ) ПГО «Центргеология» в течение ряда лет ведет работы по оценке ореолов загрязнения и выбору участков размещения отходов. В ЦИГГЭ разработаны основные положения методики комплексных исследований на полигонах складирования отходов с целью выявления масштабов, характера и динамики загрязнения почв и грунтов, растворимости, подземных и поверхностных вод. Работы эти необходимо проводить, во-первых, для изучения влияния эксплуатируемых, а также закрытых полигонов (учитывая большую инерционность процессов загрязнения) с целью прогнозирования дальнейших измерений среды; во-вторых, для обоснования выбора мест, наиболее подходящих для размещения промышленных и бытовых отходов.

Методикой предусматривается выполнение следующих работ: 1) изучение фоновых материалов для оценки геологического строения территории, защищенности водоносных горизонтов, направления базисного стока, определения источников загрязнения, степени и характера загрязнения грунтов и подземных вод; 2) дешифрирование крупномасштабных АФС (в том числе ИК-снимков) разных лет; 3) комплексная съемка территорий размещения полигонов (инженерно-геологическая, гидрогеоло-

гическая, ландшафтно-геохимическая) масштабов 1 : 2000—1 : 5000; 4) проведение режимных гидрогеологических и ландшафтно-геохимических наблюдений, в том числе снежевой съемки для выявления динамики загрязнения (главным образом теплового и химического) геологической среды; 5) опытно-фильтрационные работы для определения гидравлических характеристик основных водоносных горизонтов; 6) режимные геофизические работы (электропрофилирование, микровЭЗ, термометрия) для наблюдений за динамикой загрязнения подземных вод; 7) лабораторные работы (спектральные и химические анализы почв и грунтов, полные и сокращенные анализы воды, определения физико-механических свойств грунтов); 8) моделирование миграционных процессов; 9) составление комплекта карт на типовые полигоны (инженерно-геологических, гидрогеологических, ландшафтно-геохимических, защищенности основных водоносных горизонтов).

При гидрогеохимическом картировании важным видом работ является проведение экспресс-анализов водных проб непосредственно на месте их отбора, для чего можно использовать полевую лабораторию «КО-МАР», а также сокращенные ее варианты. Для картирования элементов-загрязнителей подземных вод в районах свалок целесообразно на месте определять температуру и pH пробы, содержание K, NO<sub>3</sub>, Fe, ΣMe, HCO<sub>3</sub>, Ca+Mg, NH<sub>4</sub>, O<sub>своб.</sub>, Cl.

В соответствии с разработанной методикой ЦИГГЭ были проведены комплексные исследования на одном из крупных типовых полигонов, где складированы промышленные (шлак, древесная стружка, резина, бумага, вата, фольга и др.) и бытовые отходы [3, 5]. В твердых бытовых отходах, поступающих на свалку, содержатся значительные количества тяжелых металлов, которые присутствуют и в компосте, изготовленном на перерабатывающих заводах. Золы и шлаки бытового мусора содержат широкий спектр металлов, концентрация которых по свинцу, цинку и олову достигает, например, 100 и более относительных концентраций. Органическая фракция твердых бытовых отходов составляет более половины от их массы. По данным спектральных анализов, материал свалки существенно обогащен Zn, Pb, Cu, Cr, Ni.

Полигон эксплуатируется практически непрерывно в течение 20 лет. Он расположен на месте бывшего песчаного карьера, состоявшего из системы выемок глубиной до 16 м. К настоящему времени отходы заполнили карьер и образовали насыпь высотой до 7 м на площади более 50 га, перекрывающую контуры карьера. Мощность слоя складированных здесь отходов варьирует от первых метров до 25 м. Водоносный горизонт песков незашщщен и значительно загрязнен.

Свалка расположена на высокой террасе реки, примерно в 500 м от водотока. Низкие речные террасы редуцированы; ширина высокой поймы достигает 500 м. Мощность зоны аэрации в аллювиальных отложениях на участке свалки составляет 3—18 м. Четвертичные и верхнеюрские песчаные образования подстилаются юрскими глинами, которые являются водоупором и имеют мощность в районе бывшего карьера более 20 м; а в пределах высокой поймы 2—12 м. Ниже, на глубинах от 20 до 55 м залегают водоносные каменноугольные известняки подольского и каширского горизонтов, которые считаются условно защищенными.

На полигоне после предварительного изучения зоны его влияния на геологическую среду были организованы и третий год проводятся стационарные гидрогеологические, ландшафтно-геохимические и геофизические наблюдения, позволяющие установить масштабы, характер и динамику загрязнения поверхностных и подземных вод, почв, грунтов и растительности. Ниже рассматриваются некоторые результаты этих работ.

Для распространения загрязнений в данном районе большое значение имеют особенности подземного рельефа юрского водоупора, в частности, ложбины в кровле юрских глин, ориентированные перпендикуляр-

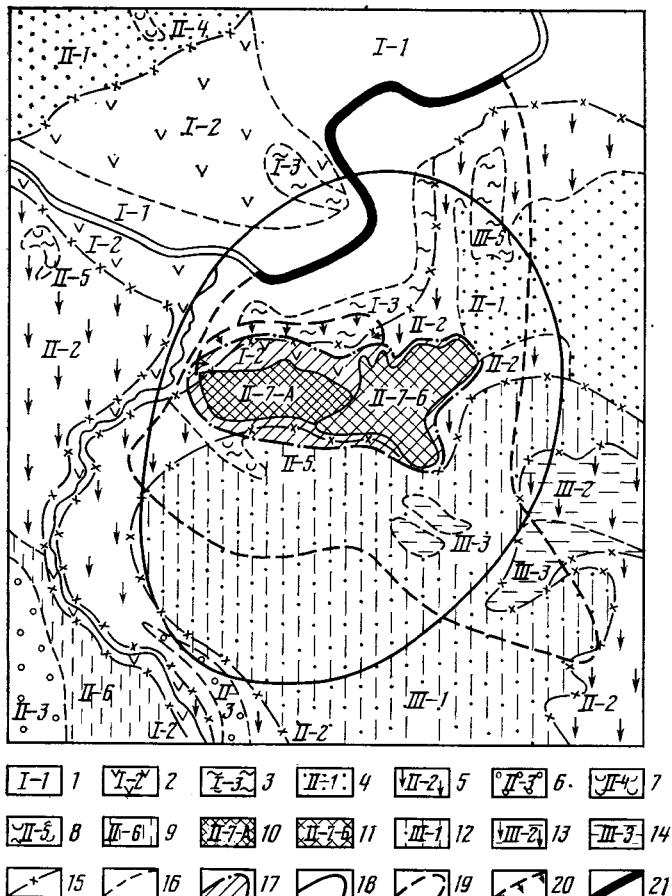


Рис. 1. Карта-схема зоны влияния свалки на геологическую среду. Ландшафты поймы: 1 — природно-территориальный комплекс (ПТК) прирусловой и центральной частей поймы; 2 — ПТК пониженных, переувлажненных частей поймы; 3 — ПТК замкнутых понижений поймы. Ландшафты террас: 4 — ПТК выровненных участков террас; 5 — ПТК склоновых участков террас (распаханных); 6 — ПТК склоновых участков террас под лесной растительностью; 7 — ПТК шлейфов склонов; 8 — овраги и балки; 9 — ПТК орошаемых участков террас; 10 — антропогенный ПТК эксплуатируемой свалки; 11 — антропогенный ПТК рекультивированной свалки. Ландшафты водоразделов: 12 — ПТК выровненных водораздельных участков; 13 — ПТК слабопокатых склонов водоразделов; 14 — ПТК пониженных участков водоразделов. Прочие обозначения: 15 — границы выделенных ландшафтов; 16 — границы ПТК; 17 — границы зоны активного загрязнения ландшафтов; 18 — границы зоны распространения гнилостного запаха; 19 — границы зоны загрязнения грунтовых вод; 20 — границы зоны интенсивного загрязнения поверхностных вод; 21 — участок реки, загрязненный стоками

но руслу реки и погружающиеся в сторону водораздела. Благодаря этому значительная часть стока грунтовых вод в зоне влияния свалки направлена в сторону от речного русла.

Согласно результатам гидрогеохимического опробования и анализов, радиус зоны загрязнения первого от поверхности водоносного горизонта (в песках) достигает 1,5—2 км; в этой зоне минерализация подземных вод, а также концентрации ионов  $\text{Cl}$  и  $\text{SO}_4$  превышают фоновые значения.

Подземные воды каменноугольных отложений практически не загрязнены, хотя имеется реальная опасность проникновения в них инфильтрата на обнаруженных электrorазведкой участках пониженной мощности юрского водоупора, проницаемость которого к тому же может возрасти в присутствии некоторых ионов, содержащихся в инфильтрате [1].

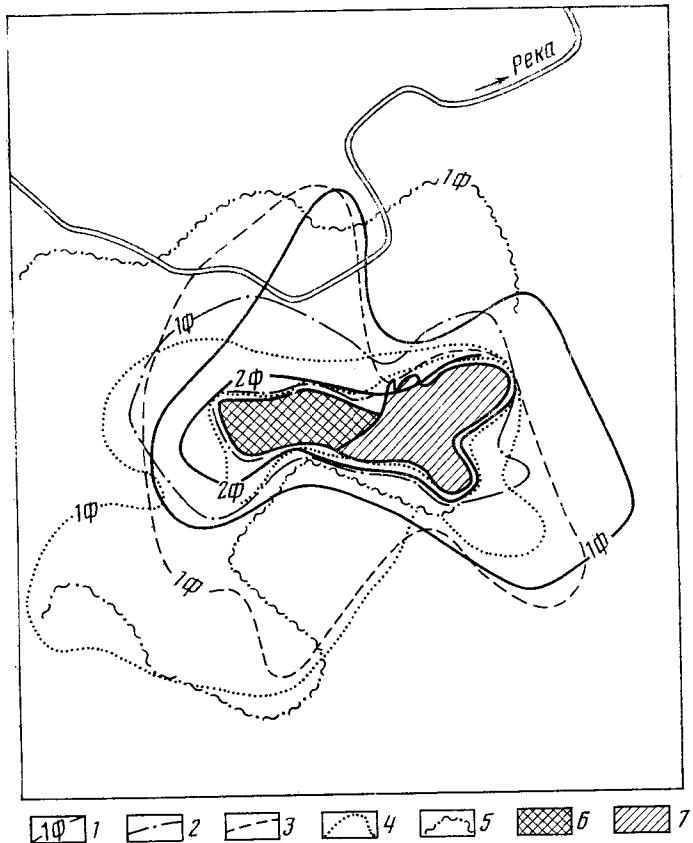


Рис. 2. Схема загрязнения почв микроэлементами: 1 — изолинии концентраций хрома: (1φ — фоновые значения; 2φ — превышающие фоновые значения в два раза); 2 — изолинии концентрации меди; 3 — изолинии концентрации свинца; 4 — изолинии концентрации цинка; 5 — изолинии концентрации никеля; 6 — территория действующей свалки; 7 — территория рекультивированной свалки

Зона интенсивного влияния свалки на поверхностный водоток простирается на 400—500 м вниз по течению в северном направлении. На этом участке реки отмечается повышение минерализации воды (в 10—20 раз); концентрация  $\text{SO}_4$  в 2—3 раза превышает фоновый уровень,  $\text{Cl}$  — в 40—60 раз,  $\text{NH}_4$  — в 4—8 раз,  $\text{Na}$  — в 10—20 раз,  $\text{Sr}$  — в 2—3 раза. Менее интенсивное влияние свалки прослеживается вниз по течению реки на расстоянии примерно до 2,5 км, где минерализация воды все еще превышает фоновое значение временами в 2—3 раза (рис. 1).

На основании спектральных и агрохимических анализов почв и растительности установлено, что величина зоны интенсивного загрязнения указанных компонентов среды составляет от 1 км на юг территории до 1,5—2 км к северу от полигона, в направлении регионального уклона поверхности.

Почвы в районе полигона обогащены Zn, Pb, Cu, Cr и Ni, концентрации которых превышают фоновые значения в несколько раз. Подвижность тяжелых металлов определяет их распределение по площади: к северу от свалки, в сторону регионального уклона, от 500 м (Zn, Cu) до 1,5 км (Pb, Ni, Cr); к юго-западу, в сторону местного уклона, от 500 м (Cu, Cr) до 1,6 км (Pb, Ni, Zn). В юго-восточном направлении, в сторону преобладающих ветров, зона загрязнения Pb, Cr, Zn достигает

400 м (рис. 2). Повышенные концентрации указанных металлов фиксируются в почвах на глубине 10—15 см.

Следует отметить, что после рекультивации (экранирования) отдельных участков свалки зона загрязнения значительно сузилась. В случаях стихийных пожаров, которые часто возникают из-за большого выделения горючих газов, дым распространяется на расстояние 10 км и более по направлению господствующих ветров.

Таким образом, выявляются значительно большие, чем принято считать, масштабы и интенсивность воздействия крупной свалки, обнаруживается сложный характер загрязнения различных компонентов ландшафта и геологической среды, связанный с разнообразными механизмами процессов переноса и особенностями строения данного участка. Это подтверждилось результатами проведенных ЦИГГЭ обследований состояния ряда других полигонов складирования промышленных и бытовых отходов. В этой связи существующие в настоящее время нормативные требования, касающиеся выбора участков, проектирования свалок и назначения зон санитарной охраны, отраженные, в частности в СНиП и ряде ведомственных инструкций [2, 6], следует признать недостаточно обоснованными и не соответствующими запросам практики. Так, нельзя признать удовлетворительным, когда оборудование и зона санитарной охраны свалки назначаются практически произвольно, без должного учета реальных масштабов загрязнений, механизма их миграции и реакции геологической среды на существование полигона размещения отходов.

Наши исследования показывают, что назрела необходимость разработки специальных требований и норм, посвященных экологически обоснованному выбору мест и оборудованию полигонов, который должен учитывать динамику природно-техногенного комплекса свалка — природная среда, крупность полигона, состав отходов, длительность эксплуатации и инерционность процессов изменения геологической среды.

Чрезвычайно важен также вопрос создания сети режимных гидро-геологических, ландшафтно-геохимических и, возможно, геофизических наблюдений. Следует отметить, что за рубежом, в особенности в странах с небольшим земельным и водным потенциалом (Великобритания, Нидерланды, ФРГ), создание режимной наблюдательной сети в районах свалок крупного и среднего масштаба становится правилом [8, 9]. ЦИГГЭ была создана режимная наблюдательная сеть на одном из полигонов; в 1986 г. планируется создание сети еще на четырех крупных полигонах. Задачей этих работ, помимо оценки масштабов и динамики влияния свалки на геологическую среду, является разработка рекомендаций по обоснованию схемы, состава и периодичности режимных наблюдений. Можно предполагать, что в ближайшем будущем возникнет и вопрос о ведомственной принадлежности подобных режимных сетей.

## Выходы

1. Проведенные исследования показывают сложный характер гео- и гидрохимического влияния крупного полигона размещения промышленных и бытовых отходов на компоненты ландшафтов и геологической среды. Эти работы имеют большое значение для экологически обоснованного выбора мест размещения отходов и назначения зон санитарной охраны.

2. Установлено, что ореол загрязнения среды вокруг крупной свалки, функционирующей 20 лет, по многим компонентам в 2—3 раза превышает рекомендуемую СНиП ширину зоны санитарной охраны. Обследование состояния ряда крупных свалок показало, что применяемые в настоящее время нормативные требования, касающиеся выбора участков, оборудования свалок и назначения зон санитарной охраны, нуждаются в существенном пересмотре.

3. Полигоны размещения промышленных и бытовых отходов должны оборудоваться специализированной режимной сетью для гидрогеологических, ландшафтно-геохимических и геофизических наблюдений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брилинг И. А. Фильтрация в глинистых породах. М.: Изд-во ОНТИ ВИЭМС, 1984. 58 с.
2. Инструкция по проектированию и эксплуатации полигонов для твердых бытовых отходов. М.: Изд-во АКХ им. К. Д. Памфилова, 1983. 40 с.
3. Мягков Н. И. и др. Твердые бытовые отходы города. Л.: Стройиздат, 1978. 34 с.
4. Оценка изменений гидрогеологических условий под влиянием производственной деятельности. М.: Недра, 1978. 264 с.
5. Санитарная очистка городов от твердых бытовых отходов/Под ред. Александровской З. И. М., 1977, с. 42.
6. СНиП II-60-75\*. Планировка и застройка городов, поселков и сельских населенных пунктов. М.: Стройиздат, 1976, с. 53.
7. Fracszek E. Zmiany warunkow hydrochemicznych w rejonie wysypisze odpadow komunalnych w Milanowku. Mat. 3 Sympoz. Krakow, 1985, с. 383—390.
8. Heitfeld K. H. e. a. Geologische und hydrogeologische Aspekte bei der Planung und beim Betrieb von Haus-und Industriemuldeponieren.—Wasser und Boden, 1984, B. 36, № 11, S. 550—555.
9. Morgan J. M. e. a. The hydrological effects of gravel winning in an area west of London, U. K.—Ground Water, 1984, B. 22, № 2, S. 154—161.
10. Welton R. D. County restores groundwater aquifer.—Publ. Works, 1985, B. 116, № 7, p. 58—60.

ПГО Центргеология

Поступила в редакцию  
15.II.1986

УДК 624.131

ЛАПИЦКИЙ С. А., АЛЕКСЕЕНКО Г. П., ОСИПОВ Ю. Б.

## ЭТАПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ И ГРУНТОВ ЗОНЫ АЭРАЦИИ В РАЙОНАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Загрязнение почв и грунтов в районах действия горнодобывающих предприятий происходит с различной скоростью и имеет разные масштабы. Оно зависит не только от интенсивности разработки месторождения и объемов отходов, образующихся на разных стадиях его освоения, но и от суммарного количества загрязняющих веществ, вовлекаемых в процессы их техногенной миграции. Под загрязнением понимается увеличение концентрации любых токсичных веществ в окружающей среде выше их фонового содержания или появление в ней новых токсичных веществ, не формирующихся в ходе природных процессов.

Горнодобывающее предприятие поставляет в окружающую среду как имеющиеся в полезном ископаемом или во вмещающих породах токсичные вещества (например, тяжелые металлы), так и соединения, ранее не существовавшие в природном комплексе (например, кислоты, щелочи или органические соединения, используемые при обогащении полезных ископаемых). Эти вещества выносятся из отвалов, терриконов, хвостохранилищ, отстойников, шламохранилищ и прудов-накопителей.

По мере освоения месторождения отходы обычно накапливаются, а следовательно, суммарное количество потенциально опасных веществ увеличивается. Необходимо отметить, что миграция загрязняющих веществ может продолжаться длительный период после ликвидации месторождения и прекращения работ до тех пор, пока в природной системе не установится равновесие.

Естественно, что еще до начала освоения месторождения в геологической среде существуют природные ореолы рассеяния элементов, в ряде случаев токсичных, которые могут быть обнаружены (и обнаруживаются при проведении литохимической съемки) в рыхлых отложениях (почвах, грунтах). На стадии разведки месторождения выявляются существующие геохимические аномалии, их размеры, контуры и степень превышения над фоновым содержанием определяемого элемента [5]. На этой стадии почти не происходит техногенного вмешательства в геологическую среду, и, следовательно, вещества, которые могут выступать как загрязнители, не участвуют в процессах загрязнения. Исключение составляет загрязнение поверхностных вод и почв нефтепродуктами, происходящее главным образом в результате небрежности изыскателей. Материалы, полученные на этой стадии, необходимо учитывать для оценки фоновых содержаний загрязняющих веществ при последующем исследовании в изучаемом районе.

Исследование техногенного загрязнения почв и грунтов следует начинать на стадии освоения месторождений. Эти работы должны проводиться планомерно, по этапам, отличающимся степенью детальности, что позволит с минимальными экономическими затратами получить максимум информации о наличии и закономерностях распространения загрязняющих веществ в районе действия горнодобывающего предприятия.

**Этапы оценки масштаба и интенсивности загрязнения почв и грунтов**

Этап	Вид работ	Получаемые результаты
I. Рекогносцировочные исследования	1. Сбор и анализ геологической и технической документации  2. Опытно-методические работы	1. Предварительное выделение типов грунтов и почв (распространенность, мощность, строение) 2. Выделение типов ландшафтов 3. Определение набора загрязняющих веществ 4. Выявление источников загрязнения
II. Предварительные исследования	1. Заложение сети опробования и отбор проб почв и грунтов с поверхности  2. Определение физических и водно-физических свойств почв и грунтов	1. Предварительное оконтуривание ореолов загрязнения и выявление потоков рассеяния. Выбор сети опробования 2. Определение фонового содержания загрязняющих веществ
III. Детальные исследования	1. Опробование почвенно-грунтовой толщи  2. Определение характеристик толщи и параметров процессов, влияющих на загрязнение  3. Изучение сорбционной способности отдельных литолого-генетических типов почв и грунтов	1. Строение и мощность почвенно-грунтовой толщи 2. Выделение ведущих процессов, обуславливающих загрязнение, и их направленность для целей прогнозирования 3. Расчет рабочей емкости толщи и оценка ее как геохимического барьера
IV. Долговременные исследования	1. Организация режимных наблюдений для контроля за изменением и масштабом загрязнения	1. Оценка скорости накопления и распространения веществ-загрязнителей в почвенно-грунтовой толще

Все работы по исследованию загрязнения почв и грунтов подразделены нами на четыре этапа (таблица):

**I этап — рекогносцировочные исследования**, на нем выявляются наиболее общие закономерности распространения загрязняющих веществ. Исходя из вида полезного ископаемого и технологической схемы обогащения, уточняются возможные вещества-загрязнители, степень их токсичности, формы существования и состав возможных новообразующихся соединений. На основе анализа крупномасштабных геологических, геохимических, инженерно-геологических, гидрогеологических, геоморфологических и почвенных карт изучается геологическое и геоморфологическое строение района, распространенность и состав почв и грунтов. Потенциальная зона загрязнения выделяется с учетом характера источников загрязнения, их местоположения, характера рельефа и типа ландшафта. Возможные размеры зоны загрязнения определяются видом загрязнителя, путями его миграции и зависят от литологических типов почв и грунтов, характера и распространенности постоянных и временных водотоков, близостью водоносного горизонта.

После анализа первичной документации на этом же этапе проводятся опытно-методические работы [5] для обеспечения достоверности опро-

бованияя техногенного ореола загрязнения. Рекогносцировочное ландшафтно-геохимическое картирование проводится по маршрутам, закладываемым на основе изучения первичной документации, по направлениям наиболее вероятных путей миграции веществ-загрязнителей. Расстояние между профилями зависит от масштаба работ и сложности геологического и ландшафтного строения исследуемой территории. Частота точек наблюдения по маршруту определяется количеством элементарных ландшафтов и разнообразием генетических типов почв и грунтов. Для каждого ландшафта следует делать одну-две точки опробования. Обязательно опробуются все водопроявления.

В результате работ на этапе рекогносцировочных исследований проводится предварительное оконтуривание ореолов загрязнения, выявляются потоки рассеяния и определяется фоновое содержание веществ-загрязнителей.

**II этап — предварительные исследования.** По данным, полученным на этапе рекогносцировочных исследований, выбирается и закладывается сеть поверхностного опробования почв и грунтов для изучения ореолов загрязнения и потоков рассеяния. Протяженность профилей опробования и расстояния между ними зависят от масштаба работ и преобладающих путей переноса загрязняющих веществ. Так, например, при переносе загрязнителей через атмосферу длина профилей опробования может достигать нескольких десятков километров [2], а при их переносе в результате плоскостного смыва длина профилей будет меняться от сотен метров до нескольких километров.

Полученные в результате аналитических работ значения концентраций загрязняющих веществ в почвах и грунтах позволяют уточнить границы ореолов загрязнения и потоков рассеяния. Одновременно отбираются также образцы для изучения физических и водо-физических свойств почв и грунтов. Выделение литологических типов почв и грунтов на этом этапе проводится по минимальному набору показателей [4].

**III этап — детальные исследования,** на нем проводится широкий комплекс работ по оценке строения почвенно-грунтовой толщи и характеру распространения в ней загрязняющих веществ.

Детально изучаются все литолого-генетические типы почв и грунтов, слагающие исследуемую толщу. На этом этапе кроме отбора проб с поверхности с использованием ранее заложенной сети опробования, отбираются монолиты и образцы пород нарушенного сложения из шурfov и скважин. Для выделения ведущих процессов, протекающих в почвенно-грунтовой толще при ее взаимодействии с техногенными потоками, необходимо знать состав и свойства как самой толщи, так и этих потоков.

Если на втором этапе можно удовлетвориться минимальным количеством показателей, характеризующих почвы и грунты, то при детальном изучении должен быть определен широкий набор показателей и параметров, отражающих свойства толщи и условия миграции в ней загрязняющих веществ. При этом особое внимание должно быть удалено таким из них, как коэффициенты фильтрации, молекулярной диффузии, дисперсии, влагопереноса, значение pH техногенных потоков и поровых растворов, окислительно-восстановительные потенциалы в почвенно-грунтовой толще.

Исследование свойств образцов и определение содержания в них загрязняющих веществ позволяют уточнить строение изучаемой почвенно-грунтовой толщи и оценить распространение в ней загрязнителей. Загрязняющие вещества либо проходят через почвенно-грунтовую толщу транзитом, либо задерживаются ею. В последнем случае толща проявляет себя как один из видов геохимических барьеров [3].

Изучение сорбционной способности почв и грунтов по отношению к различным загрязняющим веществам дает возможность оценить сорб-

ционную способность отдельных литолого-генетических типов. Рассчитав рабочую емкость каждого выделенного типа, можно определить рабочую емкость всей изучаемой толщи и оценить ее как геохимический барьер по отношению к тому или иному виду загрязнителя [1]. Это позволит дать соответствующие рекомендации как при выборе новых мест для складирования отходов, отвалов, шламохранилищ, так и при проведении рекультивационных и защитных работ для создания экранов необходимой протяженности, мощности и сорбционной емкости с целью предотвращения миграции загрязняющих веществ.

**IV этап — долговременные исследования.** После определения основных веществ-загрязнителей, их миграционных форм, путей миграции, ведущих процессов и установления границ зоны загрязнения проводятся режимные наблюдения за изменением масштаба и интенсивности загрязнения. При этом учитывается сеть опробования, использованная на предыдущих этапах. Отбор проб при режимных наблюдениях должен осуществляться с определенной периодичностью. Следует принимать во внимание сезонно-климатические условия: а) зимой проводить сугревую съемку для оценки загрязнения, распространяющегося через атмосферу; б) после таяния снега, после паводка и после сезона дождей — для количественной оценки выноса загрязняющих веществ плоскостным стоком в почвы, грунты и поверхностные воды; в) в засушливый период — для оценки количества загрязняющих веществ, поглощенных почвами и грунтами.

По данным режимных наблюдений, используя результаты полученные на предыдущих этапах работ, на основе сравнительного анализа оценивают скорость распространения и накопления загрязняющих веществ в почвенно-грунтовой толще с учетом ее буферных свойств и типа геохимического барьера по отношению к техногенному потоку. При этом следует иметь в виду, что в процессе работы горнодобывающего предприятия может измениться технология обогащения, приводящая к изменению состава и концентрации техногенных потоков, а также к появлению новых загрязнителей. Кроме того, могут меняться скорости протекания ведущих процессов, определяющих загрязнение, снижаться буферные свойства почвенно-грунтовой толщи.

Имея все необходимые параметры для оценки загрязнения, можно прогнозировать его распространение в почвенно-грунтовой толще на определенный период времени, когда влияющие на процесс загрязнения природные и техногенные факторы не будут значительно меняться.

Необходимо подчеркнуть, что на каждом последующем этапе учитываются результаты работ предыдущего. Тем не менее на любом из них с соответствующей степенью детальности можно оценить загрязнение почвенно-грунтовой толщи.

Каждый из четырех этапов или все они, последовательно выполненные один за другим, могут быть проведены в любой период существования месторождения. Очевидно, что на стадии разведки месторождения в связи со сравнительно незначительным техногенным вмешательством в геологическую среду работ по исследованию загрязнения не будет. Данные лихтогимической съемки, полученные в ходе разведочных работ, позволяют установить содержание в почвах и грунтах тех элементов, которые могут в дальнейшем выступать как загрязнители, т. е. установить фоновый уровень загрязнения до начала эксплуатации горнодобывающего предприятия.

Угроза загрязнения геологической среды возникает только на стадии освоения месторождения. В начале работы по исследованию загрязнения могут ограничиваться I—II этапами, а по мере освоения месторождения и в зависимости от исследовательских задач работы могут проводиться по III—IV этапам.

После окончания разработки месторождения, несмотря на ликвидацию горных выработок, загрязняющие вещества могут мигрировать из отвалов вмещающей породы, хвостохранилищ и отходов обогащения. В это время целесообразно продолжать проводить режимные наблюдения. Периодичность наблюдений и степень детальности работ выбираются с учетом данных об интенсивности распространения и масштабах загрязнения почвенно-грунтовой толщи, полученных в результате исследований на более ранних этапах.

Для оперативного получения информации о характере и скорости распространения загрязнения желательно на каждом из четырех этапов использовать современные полевые экспресс-методы, позволяющие прямо на месте определять наличие загрязнения.

Таким образом, проведение работ по изучению загрязнения почв и грунтов в районах деятельности горнодобывающих предприятий согласно предлагаемой схеме даст достаточное количество информации о наличии загрязнения, о свойствах почвенно-грунтовой толщи и о процессах, протекающих в ней, и позволит оценить интенсивность и масштаб загрязнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеенко Г. П., Лапицкий С. А. Основные положения методики оценки загрязнения почв и горных пород в районах действия горнодобывающих предприятий//Инж. геол. 1985. № 6. С. 102—106.
2. Махонько Э. П., Малахов С. Г., Блинов Б. К. и др. Содержание тяжелых металлов в растворимых осадками формах в выпадениях в зависимости от расстояния от источника загрязнения//Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 42—52.
3. Перельман А. И. Биокосные системы Земли. М.: Наука, 1977. 160 с.
4. СНиП II-15-74. Основания зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1975. 64 с.
5. Соловьев А. П. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1983. 191 с.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
18.III.1986

УДК 624.131

ИВАНЕНКО В. И., МЕЛЬНИКОВ Б. Н., ОСИПОВ В. И.,  
НЕСТЕРОВ А. И.**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ  
ПРИ РАСЧЕТАХ ГЕОТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ****Введение**

В настоящее время многие инженерные сооружения приходится возводить в сложных инженерно-геологических условиях. Использование традиционных методов подготовки их оснований часто не обеспечивает необходимой надежности или требует больших дополнительных затрат на создание нулевых циклов. Поэтому возникла необходимость поиска новых решений в области систем «основание—фундамент».

Разработки, проведенные в последние годы в Уральском промстройинституте и на кафедре грунтоведения и инженерной геологии МГУ, позволяют найти одно из таких решений, заключающееся в создании в основании сооружений так называемых геотехногенных массивов, обладающих необходимой несущей способностью и устойчивостью [4,7—9]. В основу создания таких массивов положен принцип образования объемной природно-техногенной структуры со строго определенными функциональными возможностями, в которой природные и техногенные элементы взаимодействуют между собой, образуя единый несущий объем основания. В качестве природных элементов используется массив ненарушенного грунта, а техногенных — искусственно измененные его части и элементы из других материалов.

Для широкого внедрения в практику строительства этого метода необходимо разработать способы расчета, позволяющие оценить несущую способность геотехногенного массива и его напряженно-деформированное состояние при различных нагрузках. Важным этапом в такой разработке является определение жесткостных характеристик.

**1. Состояние вопроса**

Ранее, в работах [4, 7], нами была принята общая расчетная модель геотехногенного массива в виде трехслойной несимметричной пластины: верхний слой — горизонтальный несущий элемент, работающий как фундаментная плита большой площади; средний слой, являющийся грунтовой плитой, улучшенной методами технической мелиорации, и нижний (подстилающий), несжимаемый слой. При этом, как правило, в целях экономии основных строительных материалов без ухудшения прочностных свойств горизонтальный несущий элемент вместо сплошной железобетонной плиты может быть выполнен также в виде слоистой, в частности трехслойной несимметричной конструкции.

Первые работы по вопросам расчета трехслойных панелей были выполнены в 30-е годы. После второй мировой войны в связи с применением таких панелей в самолетостроении появился целый ряд работ, посвященных главным образом вопросам устойчивости трехслойных обшивок [1].

При проектировании трехслойных панелей, как правило, производится расчет их устойчивости и продольно-поперечного изгиба при различных условиях нагружения и рассматривается задача рационального выбора параметров панелей. Большое значение имеет проверка прочности заполнителя, его связи с внешними слоями и местной устойчивости элементов панелей [1, 5]. При этом, если заполнитель достаточно жесткий, то панель работает так, что для нее справедлива гипотеза прямых нормалей, и расчет ее можно вести в основном по формулам для расчета однослойной пластины, вводя в них жесткости составных сечений, определяемые обычными способами сопротивления материалов. Однако для большинства заполнителей, которые по весовым соображениям выбираются так, что жесткость их невелика, гипотеза прямых нормалей для всей трехслойной панели неприемлема и расчет следует вести с учетом влияния деформаций сдвига заполнителя на работу внешних слоев [1, 3].

Конструкции дискретных и комбинированных заполнителей могут быть самыми разнообразными, в литературе приведено их более 300. При этом, например, несмотря на ячеистую структуру пенозаполнителя, считают, что он сплошной и однородный. Его характеризуют обычными для однородных материалов параметрами, которые определяют известными методами. Дискретные заполнители в трехслойных конструкциях обычно рассматривают как некоторые сплошные или ортотропные [5].

## 2. Основные расчетные гипотезы

Как отмечалось выше, расчетная схема трехслойной пластины и выбор гипотезы, которая будет положена в основу расчета, зависят от жесткостных характеристик заполнителя. Последний независимо от его конструкции и структурных особенностей аппроксимируется сплошным телом с приведенными характеристиками.

Исходя из описанной выше расчетной модели, роль заполнителя в геотехногенном массиве выполняет средний грунтовый слой, улучшенный методами технической мелиорации (погружением обломочного материала в природный массив трамбовкой, инъекцией закрепляющих растворов, нагнетанием цементно-песчаных смесей, укладкой бетонных и железобетонных блоков в отсыпанный грунт и т. д.). При этом в основании сооружения формируется жесткий каркас из техногенных элементов при минимальном заполнении ими всего структурного пространства.

Следует подчеркнуть, что если раньше при расчетах систем «основание—фундамент» рассматривалось взаимодействие фундаментной конструкции с грунтом в его природном состоянии, то в случае геотехногенного массива мы имеем дело с преобразованным грунтом, входящим в состав искусственно созданного композитного материала, свойства которого, в частности наиболее важные технические характеристики — жесткость и прочность, можно регулировать в заранее заданном интервале.

Настоящая статья посвящена нахождению путей определения так называемых эффективных жесткостей среднего преобразованного слоя грунта на примере геотехногенного массива, разработанного для условий г. Волгодонска [4, 7]. Большинство положений, изложенных здесь, применимо при расчетах геотехногенных массивов других типов.

Эффективные жесткости среднего грунтового слоя можно определить на основе теории композитов, возникшей на стыке различных областей знаний и тесно связанной с запросами современной техники. Быстрое развитие этой теории привело к появлению технологии создания материалов с высокой удельной прочностью и удельным модулем упругости путем составления композиций из мягкого, относительно низкопрочного материала и высокопрочных волокон или частиц. Под композитами понимаются материалы, состоящие из двух или более разнородных мате-

риалов и обладающие свойствами, которых не имели исходные материалы. В строении композитов, как правило, выделяют наполнитель (дисперсную фазу) и связующее (матрицу). Определяющее влияние на свойства композита оказывает наполнитель, распределенный в связующем [10]. В нашем случае при проведении расчетов грунт среднего слоя геотехногенного массива можно считать матрицей, а песчано-цементные включения и включения, образованные нагнетанием грунтово-водной пульпы, наполнителем.

Преимущество композитов заключается в возникновении комплекса свойств, достижимых только путем соединения разнородных материалов. Теория композитов позволяет оценить вклад каждого компонента, понять роль, которую отдельные компоненты играют в формировании макроскопического поведения композита, что дает возможность обоснованно выбирать их оптимальные комбинации и получать композиты с заранее заданными свойствами [6]. Основной задачей этой теории является создание новых материалов на базе фундаментального исследования гетерогенных сред, а не только объяснение каких-либо экспериментальных результатов и случайных открытий. Как строго выведенная теория механического поведения, она содержит несколько предположений, или гипотез, определяющих границы применимости полученных результатов. В пределах этих границ теория позволяет моделировать действительное механическое поведение среды [6].

Описание поведения композита в рамках разработанной теории проводится с помощью эффективных жесткостей, под которыми понимаются средние меры жесткости, учитывающие свойства всех фаз гетерогенной среды и их взаимодействия [6]. Хотя практические задачи гетерогенных сред можно решать с учетом нелинейной кинематики деформирования, на данном этапе будем пользоваться соотношениями, выведенными в предположении о линейно-упругом поведении материала, позволяющем реалистично описывать поведение широкого класса материалов. Это допущение представляет собой основу современных методов инженерного проектирования. Кроме того, принято считать, что при эксплуатационных нагрузках материалы, входящие в систему «основание—фундамент», под сооружением ведут себя как упругое тело.

Линейная теория упругости является одним из разделов механики деформируемых сред (механики континуума). Гипотеза континуума включает в себя процедуру статистического осреднения, с помощью которой действительное состояние и структура материала идеализируются так, что материал считается континуумом. Эта гипотеза основана на существовании некоторых мер, связанных со свойствами, определяющими деформируемость среды. С принятием модели континуума становится применимой концепция гомогенности; в этом случае считают, что присущие однородной среде свойства одинаковы во всех точках среды [6]. Гипотеза континуума используется в механике грунтов, применима она и при расчетах геотехногенных массивов.

Для среднего грунтового слоя преимущественно характерен тип гетерогенности с дискретными фазами, поэтому при расчетах будем пользоваться эффективными жесткостями, полученными для гетерогенных сред, в которых различные фазы отчетливо выражены. Фазы, составляющие среду, принимаются однородными и изотропными.

Если рассматривать поведение композитов с позиции механики сплошных сред, то в ее рамках невозможно учесть все эффекты, присущие композитам с большим числом дискретных фаз. Поэтому для аппроксимации среднего грунтового слоя будем применять идеализированные геометрические модели гетерогенных систем, которые позволяют аналитически оценить макроскопические свойства гетерогенных сред через геометрические и физические характеристики составляющих их фаз. При этом будем иметь в виду, что во многих гетерогенных системах, в кото-

рых действует кинематическая движущая сила и достигается термодинамическое равновесие, всегда встречаются три формы надмолекулярных образований; сферическая, цилиндрическая или пластинчатая [6]. Геотехногенный массив относится именно к таким системам. Экспериментально нами установлено, что после закачки песчано-цементного раствора образовавшиеся включения в грунте, различным образом ориентированные в пространстве, имели пластинчатую форму.

Средний слой геотехногенного массива удовлетворяет и условию эффективной или эквивалентной гомогенности [6]. Понятие эквивалентной гомогенности позволяет использовать процедуру осреднения для предсказания эффективных свойств идеализированной гомогенной среды через свойства фаз и некоторые их геометрические характеристики. Полученные характеристики эффективных свойств можно применять в расчетах нагруженного тела из композита.

Эффективные жесткости линейно-упругого тела, обозначенные тензором  $C_{ijkl}$ , определяются посредством соотношения

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = C_{ijkl} \langle \varepsilon_{kl} \rangle, \quad (1)$$

где  $\langle \sigma_{ij} \rangle$  и  $\langle \varepsilon_{kl} \rangle$  — средние напряжения и деформация в пределах представительного элемента [6].

Средний грунтовый слой вполне удовлетворяет гипотезам, регламентирующим применимость теории композитов, поэтому в расчетах геотехногенных массивов мы можем использовать полученные в ее рамках результаты.

### 3. Эффективные жесткости среднего грунтового слоя геотехногенного массива

Прежде чем приступить к поиску решения задачи об эффективных свойствах среднего слоя геотехногенного массива, необходимо установить тип симметрии, который имеет место в рассматриваемой среде. В данном случае средний слой можно рассматривать как трансверсально-либо макроскопически изотропную гетерогенную среду. Затем нужно определить форму включений. Как отмечалось выше, при закачке цементно-песчаного раствора образуются пластинчатые включения, различным образом ориентированные в пространстве. Важно отметить, что армирование пластинчатыми включениями является наилучшим, когда нужно обеспечить композиту жесткость при малом объемном содержании вводимых частиц и одновременно улучшить прочность композита [6].

В нашем случае средний слой, вероятнее всего, следует рассматривать как макроскопически изотропную гетерогенную среду. Для оценки ее констант можно использовать определенные любым способом эффективные свойства трансверсально изотропной среды, которая обладает симметрией свойств в плоскости, перпендикулярной к направлению ориентации волокон или к направлению действия внешней силы. В нашем случае ось симметрии перпендикулярна поверхности геотехногенного массива. Тогда соотношения «напряжение—деформация» для трансверсально-изотропного тела можно записать в виде [6]

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{11}\varepsilon_{11} + C_{12}\varepsilon_{22} + C_{13}\varepsilon_{33}, \\ \sigma_{22} &= C_{12}\varepsilon_{11} + C_{22}\varepsilon_{22} + C_{23}\varepsilon_{33}, \\ \sigma_{33} &= C_{13}\varepsilon_{11} + C_{23}\varepsilon_{22} + C_{33}\varepsilon_{33}, \\ \sigma_{12} &= 2C_{66}\varepsilon_{12}, \\ \sigma_{23} &= (C_{22} - C_{23})\varepsilon_{23}, \\ \sigma_{31} &= 2C_{66}\varepsilon_{31}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тензор, определяющий эффективные жесткости, имеет вид

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}(C_{12} - C_{23}) & 0 & 0 \\ & & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Константы  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{66}$  характеризуют пять независимых эффективных свойств среды. Хотя они и позволяют полностью описать жесткость среды, ими пользуются редко, поскольку их трудно определить с помощью прямых механических экспериментов. Поэтому на практике применяют технические константы ( $E_{11}$  — модуль упругости при одноосном напряжении,  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{13}$  — коэффициенты Пуассона,  $K_{23}$  — объемный модуль упругости при плоском деформированном состоянии,  $\mu_{12}$ ,  $\mu_{13}$  — модули сдвига), которые с упомянутыми выше константами связаны соотношениями [6]

$$\begin{aligned} C_{11} &= E_{11} + 4\theta_{12}^2 K_{23}, \\ C_{12} &= 2K_{23}\theta_{12}, \\ C_{22} &= \mu_{23} + K_{23}, \\ C_{23} &= -\mu_{23} + K_{23}, \\ C_{66} &= \mu_{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для того чтобы выразить в аналитическом виде пять констант через свойства компонентов (включений и матрицы) и их объемное содержание, необходимо ввести структурную модель композита. Наиболее часто употребляется полидисперсная, а для определения коэффициента  $\mu_{23}$  — трехфазная модель среды. Как отмечается в работе [6], для систем композитов, представляющих практический интерес можно получить вполне реальные прогнозы констант упругости на основании полидисперсной и трехфазной (для  $\mu_{23}$ ) моделей. Важно отметить, что расчеты по этим моделям являются единственными строго обоснованными расчетами. Альтернативу этим моделям может составить множество эмпирических формул.

Будем считать, как уже говорилось выше, средний грунтовый слой макроскопически изотропной средой с произвольно ориентированными пластинчатыми включениями. Оценку ее эффективных свойств начинают со случая параллельных слоев. Такая система трансверсально-изотропна, и ее эффективная жесткость определяется соотношениями «напряжение—деформация» (2). Эффективные модули макроскопически изотропной среды находятся с помощью процедуры пространственного осреднения, которая соответствует приданию системе с параллельными волокнами всех возможных направлений в пространстве по отношению к направлению заданной деформации [6]. Если доля включений мала, а их жесткость много выше жесткости матрицы, что соответствует нашему случаю, выражения для эффективных модулей имеют вид [6]

$$K = K_m + \frac{2CE_p}{9(1-\theta_p)}, \quad (5)$$

$$\mu = \mu_m + \frac{C}{30} \frac{7 - 50\theta_p}{1 - \theta_p^2} E_p. \quad (6)$$

$$E = \frac{9K\mu}{3K + \mu} = \frac{9 \left\{ \frac{E_m}{3(1 - 2\theta_m)} + \frac{2CE_p}{9(1 - \theta_p)} \right\} \left\{ \frac{E_m}{2(1 + \theta_m)} + \frac{7 - 5\theta_p}{30(1 - \theta_p^2)} CE_p \right\}}{\frac{3E_m}{2(1 - 2\theta_m)(1 + \theta_m)} + \frac{(9 + 5\theta_p) CE_p}{10(1 - \theta_p^2)}}, \quad (7)$$

$$\theta = \frac{3K - 2\mu}{2(3K - \mu)}, \quad (8)$$

где  $C$  — объемная доля включений, индекс  $p$  указывает, что константа относится к включению, индекс  $m$  — к матрице. Для определения эффективных модулей упругости  $E$  и коэффициентов Пуассона  $\theta$  при оценочных расчетах можно пользоваться правилом смесей.

Соотношения между эффективными свойствами и свойствами фаз вместе с расчетом конкретных конструкций лежат в основе оптимизации конструкций [6].

#### 4. Пример расчета

Рассчитаем модуль деформации (упругости) среднего слоя грунтового геотехногенного массива, созданного на экспериментальной площадке в заводской зоне г. Волгодонска на основе эффективных модулей теории композитов и величин осадок нижней поверхности горизонтального несущего элемента, который можно рассматривать как жесткий квадратный штамп.

Согласно теории упругости, осадка жесткого квадратного штампа определяется по формуле [2]

$$\omega = 0,88[(1 - \theta_0^2)/E_0]Pa', \quad (9)$$

отсюда

$$E_0 = 0,88(1 - \theta_0^2)Pa'/\omega \quad (10)$$

При  $\omega = 3,92$  см,  $P = 0,892$  кг/см<sup>2</sup>,  $a' = 30$  м (сторона штампа),  $\theta_0 = 0,38$

$$E_0 = 0,88(1 - 0,38^2) \times 0,892 \text{ кг/см}^2 \times 3000 \text{ см}/3,92 \text{ см} = 514 \text{ кг/см}^2 = \\ = 51,4 \text{ МПа}$$

Для вычисления эффективного модуля упругости гетерогенной среды с пластинчатыми включениями при  $CE_p \gg E_m$  (что соответствует нашему случаю) формула (7) преобразуется к виду, удобному для практического использования [6]:

$$E_s \approx CE_p/2 + E_m. \quad (11)$$

При значениях модуля упругости включений  $E_p = 19000$  МПа, модуля упругости (деформации) матрицы (с учетом закаченной пульпы)  $E_m = 12$  МПа, объемной доли включений  $C = 0,003$

$E_s = 0,003 \times 19000 \text{ МПа}/2 + 12 \text{ МПа} = 28,5 \text{ МПа} + 12 \text{ МПа} = 40,5 \text{ МПа}.$  Сравнение величин  $E_0$  и  $E_s$  показывает достаточно хорошее соответствие между ними.

Сказанное выше позволяет сделать вывод, что математический аппарат теории композитов можно применять для получения реалистичных оценок эффективных свойств среднего грунтового слоя геотехногенного массива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. Я., Брюккер Л. Э., Куршин Л. М., Прусаков А. П. Расчет трехслойных панелей. М.: Оборонгиз, 1960. 268 с.
2. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А., Соломин В. И. Расчет конструкций на упругом основании. М.: Стройиздат, 1984. 679 с.

3. Иваненко В. И., Кукунаев В. С., Мельников Б. Н., Мелешик ин И. Д. Расчет горизонтальных несущих элементов геотехногенных структур//Проектирование и строительство зданий и сооружений промышленных предприятий в сложных инженерно-геологических условиях. Л.: Изд-во Ленпромстройпроекта, 1985. С. 31—40.
4. Иваненко В. И., Мельников Б. Н., Несторов А. И. Решения «нулевых циклов» в виде геотехногенных структур (геомассивов) для условий г. Волгодонска//Проектирование и строительство зданий и сооружений промышленных предприятий в сложных инженерно-геологических условиях. Л.: Изд-во Ленпромстройпроекта, 1985. С. 41—49.
5. Кобелев В. Н., Коварский Л. Н., Тимофеев С. Н. Справочник. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 302 с.
6. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
7. Мельников Б. Н., Иваненко В. И., Несторов А. И., Осипов В. И. Принципы создания геотехногенных массивов и методов их расчета//Инж. геол., 1986. № 5. С. 22—32.
8. Мельников Б. Н., Несторов А. И., Осипов В. И. Создание геотехногенных массивов в основании инженерных сооружений на лессах//Инж. геол., 1985. № 6. С. 3—14.
9. Мельников Б. Н., Несторов А. И., Осипов В. И. Геотехногенные массивы как новый вид оснований инженерных сооружений//Инж. геол. 1985. № 2. С. 11—21.
10. Фудзии Т., Дзако Н. Механика разрушения композитных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.

Уральский промстройнипроект,  
Московский государственный университет

Поступила в редакцию  
3.III.1986

УДК 624.131→551.34

ХРУСТАЛЕВ Л. Н., ВОДОЛАЗКИН В. М.

О ДОСТОВЕРНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОЦЕНОК  
СЖИМАЕМОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ  
ПРИ ОТТАИВАНИИ

При оттаивании многолетнемерзлых грунтов их важнейшим механическим свойством является сжимаемость, ее величина определяет возможность использования этих грунтов в качестве основания зданий и сооружений, способ создания фундаментов, их конструктивные параметры и объем мелиоративных работ.

В настоящее время широко распространены два способа получения информации о сжимаемости: путем компрессионных испытаний в лаборатории образцов, отобранных из буровых скважин; путем испытаний грунта в шурфе горячим штампом. Считается, что первые уступают вторым по достоверности результатов вследствие разуплотнения образцов при отборе из скважин и наличия погрешностей опыта. Поскольку в настоящее время лабораторные испытания являются основными, вопрос оценки их достоверности является весьма актуальным. Именно этот вопрос и рассматривается в данной статье. С этой целью нами были проанализированы данные 468 компрессионных и 35 штамповых испытаний сжимаемости при оттаивании характерных литолого-генетических типов многолетнемерзлых грунтов Воркутинского района (табл. 1). Данные компрессионных испытаний получены институтом ПечорНИИпроект, а штамповых — Северным отделением НИИоснований.

Чтобы судить о достоверности приведенных цифр, прежде всего необходимо выработать эталон сравнения. Как известно, испытания грунтов на сжимаемость при оттаивании проводятся с целью прогноза устойчивости сооружения за назначенный период. Если предположить, что при осуществлении прогноза правильно описывается процесс теплового и механического взаимодействия сооружения с грунтом, то, сопоставляя результаты расчета с данными натурных наблюдений, можно оценить достоверность информации, положенной в основу этого расчета. Одним из авторов настоящей статьи ранее было произведено такое сопоставление [5].

В табл. 2 приведены значения теоретической и фактической долговечности десяти зданий в Воркуте, деформировавшихся до окончания эксплуатационного периода по причине оттаивания многолетнемерзлых грунтов. Теоретическая долговечность вычислялась через функцию надежности основания, определенную с использованием компрессионных данных табл. 1. Сопоставление математических ожиданий теоретической долговечности и фактической на момент появления признаков разрушения показывает, что они практически совпадают. Отклонения в восьми случаях из десяти не превышают односигмового интервала, что свидетельствует о точности прогноза и достоверности информации, положенной в его основу.

Точность компрессионных испытаний можно оценить следующим образом. Выбирается участок, где происходит оттаивание многолетнемерзлых грунтов, и замеряется осадка земной поверхности и глубина оттаивания. Здесь же отбираются образцы многолетнемерзлого грунта, кото-

Таблица 1

Результаты компрессионных и штамповых испытаний сжимаемости многолетнемерзлых грунтов при их оттаивании

Наименование грунта	Вид испытания, объем	Суммарная влажность, доли единиц	Влажность на границе текучести, доли единиц	Влажность на границе разграждения, доли единиц	Коэффициент пористости	Относительная деформация при оттаивании под нагрузкой, МПа					
						0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Ледово-морской суглинок	Горячий штамп, 6 испытаний	$\frac{0,468}{0,014}$	$\frac{0,250}{0,027}$	$\frac{0,136}{0,018}$	0,490	0,024	0,029	0,036	—	0,052	—
	Компрессия, 300 испытаний	$\frac{0,173}{0,039}$	$\frac{0,237}{0,028}$	$\frac{0,123}{0,016}$	0,520	0,010	0,040	0,041	—	0,015	—
	Результат сопоставления при уровне значимости 0,01, $t_{\Phi}/t_{\Pi}$	$\frac{0,34}{2,36}$	$\frac{1,42}{—}$	$\frac{0,96}{2,36}$	0,424	0,026	0,045	0,062	—	0,082	—
	Горячий штамп, 6 испытаний	$\frac{0,187}{0,066}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,598}{0,052}$	0,59	0,75	1,38	1,80	—	0,041	—
	Компрессия, 80 испытаний	$\frac{0,172}{0,035}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,529}{0,032}$	0,529	0,032	0,051	0,071	—	1,79	—
	Результат сопоставления при уровне значимости 0,01, $t_{\Phi}/t_{\Pi}$	$\frac{0,95}{2,36}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,106}{0,022}$	0,106	0,030	0,035	0,036	—	2,36	—
	Горячий штамп, 7 испытаний	$\frac{0,159}{0,013}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{1,34}{2,36}$	1,34	1,98	3,92	1,50	—	3,24	—
	Компрессия, 7 испытаний	$\frac{0,214}{0,025}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,554}{0,040}$	0,554	0,023	0,032	0,050	—	2,36	0,104
	Результаты сопоставления при уровне значимости 0,01, $t_{\Phi}/t_{\Pi}$	$\frac{2,50}{2,68}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,040}{0,012}$	0,040	0,012	0,012	0,013	—	2,36	0,021
	Горячий штамп, 4 испытания	$\frac{0,205}{0,027}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,678}{0,066}$	0,678	—	0,058	—	0,070	—	0,079
Аллювиально-морской песок, гравелистый	Горячий штамп, 6 испытаний	$\frac{0,37}{2,9}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{1,30}{2,68}$	0,30	—	0,64	—	0,029	—	0,029
	Результаты сопоставления при уровне значимости 0,01, $t_{\Phi}/t_{\Pi}$	$\frac{0,201}{0,198}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,635}{0,071}$	0,635	0,017	0,029	0,053	—	0,018	0,080
	Компрессия, 6 испытаний	$\frac{0,37}{0,027}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,723}{0,130}$	0,723	—	0,054	—	0,16	—	0,56
	Результаты сопоставления при уровне значимости 0,01, $t_{\Phi}/t_{\Pi}$	$\frac{0,220}{0,230}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{1,09}{1,09}$	0,220	0,004	0,009	0,016	—	2,68	—
	Компрессия, 75 испытаний	$\frac{0,031}{0,39}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{2,9}{2,9}$	0,230	—	0,028	—	0,064	—	0,071
Аллювиально-морской песок, мелкий	Горячий штамп, 12 испытаний	$\frac{0,194}{0,028}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,643}{0,084}$	0,194	0,012	0,014	0,022	—	0,041	—
	Компрессия, 75 испытаний	$\frac{0,230}{0,031}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{0,676}{0,091}$	0,230	0,026	0,037	0,047	—	0,057	—
	Результаты сопоставления при уровне значимости 0,01, $t_{\Phi}/t_{\Pi}$	$\frac{3,79}{2,39}$	$\frac{—}{—}$	$\frac{1,47}{2,39}$	3,79	0,016	0,019	0,020	—	0,024	—

Примечание. Для разных видов испытаний в числителе указано среднее значение показателя, в знаменателе — его стандарт.

Таблица 2

**Фактическая и теоретическая долговечность ряда зданий в Воркуте**

Наименование объекта	Теоретическая долговечность		Фактическая долговечность	
	матем. ожидание	среднее квадратическое отклонение	до появления признаков разрушения	до разрушения
Трехэтажное шлакоблочное административное здание	0,7	0,9	1	3
Трехэтажный кирпичный жилой дом по ул. Мира	10,0	4,3	4	—
То же	10,0	4,3	11	—
Одноэтажный кирпичный жилой дом по ул. Связи	7,3	3,2	3	7
Двухэтажный шлакоблочный жилой дом по ул. Красноармейской	3,3	2,0	4	—
Одноэтажный кирпичный жилой дом по ул. Комсомольской	3,0	1,9	4,5	6
Двухэтажный кирпичный жилой дом по ул. Горняков	3,8	2,2	5	—
То же	2,9	1,0	3	7
Трехэтажный кирпичный жилой дом по ул. Парковой	6,7	3,1	7	—
Пятиэтажный крупнопанельный жилой дом по ул. Народной	6,3	5,6	4	—

Таблица 3

**Осадка дневной поверхности при оттаивании многолетнемерзлых грунтов**

Наименование объекта	№ сква-жины	Интервал глубин оттаивания, м	Осадка, см		
			по маркам $s_1$	по данным компрессионных испытаний $s_2$	$(s_2 - s_1) / s_1 \times 100\%$
Экспериментальный павильон на полигоне Северного отделения НИИОСП	318	0,8—4,8	18,8	19,3	2,6
	320	5,0—7,5	23,0	7,9	—65,6
	324	0,0—5,8	24,5	25,0	2,0
Здание обогатительной фабрики	115а	0,0—17,0	48,0	55,0	12,7
	117	0,0—17,0	35,0	61,0	47

рые затем подвергаются компрессионным испытаниям. По их результатам определяется теоретическая осадка, которая сопоставляется с фактической. Такие исследования были выполнены сотрудниками Северного отделения НИИОСП в 1973, 1976 и 1981 гг. на двух объектах в Воркуте, результаты которых приведены в табл. 3. Из их анализа следует, что расхождение в определении осадки путем ее непосредственного измерения в натуре и вычислением составляет от минус 66% до плюс 47%. Необходимо отметить, что все рассматриваемые нами данные компрессионных испытаний были получены согласно ГОСТу 19706-74 [1], действовавшему до 1981 г., который не предусматривал предварительного обжатия мерзлых грунтов бытовым давлением. Если же перед опытом осуществить эту процедуру согласно действующему в настбящее время ГОСТу 24586-81 [2], то, очевидно, точность этих испытаний повысится. Так, по данным Северного отделения НИИоснований, предварительное обжатие мерзлых ледово-морских суглинков уменьшает величину их сжимаемости при оттаивании на 33%.

Как выше было показано, результаты компрессионных опытов объективно отражают деформационные характеристики многолетнемерзлых

грунтов при оттаивании. Следовательно, они могут быть сопоставлены с данными штамповых испытаний в шурфах, которые, как принято считать, обладают большей достоверностью. Для проверки этого предположения мы провели статистический анализ одних и других данных, приведенных в табл. 1. Выборки сопоставлялись между собой по критерию однородности  $t_{\phi}$  [3]:

$$t_{\phi} = \frac{|\bar{X}_{ш} - \bar{X}_{к}|}{\sqrt{\frac{n_{ш}n_{к}(n_{ш} + n_{к} - 2)}{n_{ш} + n_{к}}}},$$

где  $\bar{X}_{ш}$ ,  $\bar{X}_{к}$  — средние значения соответственно по данным штамповых и компрессионных испытаний;  $S_{ш}$ ,  $S_{к}$  — стандарты выборок;  $n_{ш}$ ,  $n_{к}$  — объемы выборок.

Значения  $t_{\phi}$  были сопоставлены с предельными значениями критерия  $t_{п}$ , который определялся при уровне значимости, равном 0,01. Значения  $t_{\phi}$  и  $t_{п}$  для каждого литолого-генетического слоя грунта приведены в табл. 1, откуда видно, что в большинстве случаев  $t_{\phi} < t_{п}$ . Это свидетельствует о статистическом соответствии выборок показателей как физических, так и деформационных свойств.

Из анализа данных табл. 1 также следует, что сжимаемость многолетнемерзлых грунтов при оттаивании, определенная методом вдавливания штампов в среднем на 23—27% меньше, чем установленная компрессионными испытаниями. В силу статистического соответствия выборок это различие может быть ложным и обусловлено малым числом штамповых испытаний. Однако поскольку статистические методы не дают однозначного ответа, возможно и иное объяснение: различие истинно и обусловлено большей достоверностью штамповых испытаний.

Из двух выдвинутых гипотез тем не менее предпочтение следует отдать первой, поскольку расчетная сжимаемость, оцененная по компрессионным данным, выше, именно ее использование увеличивает запас устойчивости сооружений, возводимых на оттаивающих грунтах. Однако если одновременно со штамповыми испытаниями в шурфе проводились бы и компрессионные одних и тех же слоев грунта, то, возможно, вторая гипотеза стала бы предпочтительнее первой, что позволило бы уменьшить объем предварительной подготовки основания. Поэтому штамповые испытания необходимо проводить параллельно с компрессионными, а не противопоставлять их друг другу, ибо последние имеют преимущество в своей массовости, а штамповые, очевидно, в достоверности.

По этому поводу еще в 1958 г. И. И. Черкасовым [6] было написано следующее: «Поскольку опыты с вдавливанием штампов трудоемки, обычно их число бывает ограниченным, поэтому полное суждение о неоднородности грунтовых оснований на всей исследуемой территории с их помощью получить затруднительно. Эти опыты следует дополнять компрессионными испытаниями... Весьма важно, чтобы компрессионные испытания проводились на образцах из тех слоев, которые были испытаны вдавливанием штампа. Сравнивая результаты полевых и компрессионных испытаний, можно установить корреляцию между ними и затем, опираясь на большое количество компрессионных опытов, распространить более достоверные результаты испытаний штампами на большую территорию». К этому следует добавить, что методика их совместного учета в настоящее время хорошо разработана (например, [4]).

## Выводы

1. Получаемая методами штамповых и компрессионных испытаний информация о сжимаемости многолетнемерзлых грунтов при оттаивании объективно отражает истинное положение.

2. При сжимаемости многолетнемерзлых грунтов более 2 см/м данные компрессионных испытаний удовлетворительно согласуются с результатами наблюдений за деформациями сооружений и осадками земной поверхности.

3. Данные компрессионных испытаний многолетнемерзлых грунтов при оттаивании статистически соответствуют данным штамповых испытаний, если соответствуют друг другу выборки показателей физических свойств образцов, испытанных тем и другим способом.

4. Пути повышения точности оценок деформируемости многолетнемерзлых грунтов при оттаивании заключаются как в повышении точности самих опытов, так и в комплексном использовании двух рассмотренных методов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 19706-74. Метод лабораторного определения коэффициентов оттаивания и сжимаемости при оттаивании мерзлых грунтов. М.: Изд-во стандартов, 1974. 15 с.
2. ГОСТ 24586-81. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов. М.: Изд-во стандартов, 1981. 32 с.
3. Ермолаев Н. Н., Михеев В. В. Надежность оснований сооружений. Л.: Стройиздат, 1976. 142 с.
4. Рац М. В. Структурные модели в инженерной геологии. М.: Недра, 1973. 216 с.
5. Хрусталев Л. Н. Приложение теории надежности к анализу опыта строительства зданий в южной зоне распространения вечномерзлых грунтов.— В кн.: Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М.: Наука, 1982, с. 126—133.
6. Черкасов И. И. Механические свойства грунтовых оснований. М.: Автотрансиздат, 1958.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
19.IX.1985

УДК 624.131.1

БОГДАНОВ М. И.

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ЛОГИКО-ФОРМАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Инженерно-геологические изыскания под объекты мелиоративного строительства проводятся практически во всех сельскохозяйственных зонах страны. Основное внимание при этом уделяется изучению условий строительства водохранилищ, плотин, каналов и других крупных сооружений, в то время как значительное количество легких сетевых конструкций, имеющих массовый характер, проектируется без достаточного учета конкретной инженерно-геологической обстановки. Одним из путей повышения качества проектировочных работ является обобщение материалов изысканий при проведении инженерно-геологического районирования для мелиоративного строительства. Но, как отмечал Л. Г. Балаев, эти работы выполняются «часто при неудачном подборе комплекса исходных инженерно-геологических характеристик или с позиций частных представлений о принципах и способах районирования» [1].

Общепринятой методики инженерно-геологического районирования для мелиоративного строительства в настоящее время не существует, и исследования в этом направлении достаточно актуальны. Предлагаемая в данной статье методика районирования предназначена для территорий с аридным климатом, требующих проведения ирригационных мероприятий. В качестве примера мы приводим Центральную Кахетию — регион, интенсивно осваиваемый в мелиоративном строительстве. Основные элементы нашей методики: логико-формальные, логические и формальные блоки и логические переходы (такая форма изложения представляется нам более четкой).

Первый блок схемы, имеющий логический характер, включает отбор значимых компонентов инженерно-геологических условий. В зависимости от конкретных целей и масштабов инженерно-геологического районирования набор значимых компонентов должен быть различным. Отобранные компоненты должны давать достаточно полное представление об инженерно-геологических условиях сооружения объектов. Так, при среднемасштабном типологическом районировании Центральной Кахетии использовался следующий набор компонентов: гидрогеологические условия (глубины залегания грунтовых вод); морфометрические особенности рельефа ( крутизна склонов и горизонтальное расчленение); экзогенные геологические процессы (площадная пораженность); грунтовые условия (тип грунтовых толщ).

Гидрогеологические условия, в частности глубины залегания грунтовых вод, определяют тип и способ строительства необходимых дренажных сооружений, предназначенных для отвода грунтовых вод в целях снижения их уровня, что необходимо для создания благоприятного водного, воздушного и солевого режимов, предупреждения заболачивания и вторичного засоления грунтов.

Морфометрические особенности рельефа крайне важны для выбора способов и техники полива орошаемых земель, правильного, обоснованного прогноза развития инженерно-геологических процессов при мелио-

ративном освоении территорий. Современные технические возможности позволяют размещать мелиоративные объекты в различных по сложности природных условиях. Однако это не только не исключает, но, на-против, предполагает обоснование целесообразности вариантов размещения сооружений, которое невозможно выполнить без знания уклонов поверхности и степени расчленения рельефа.

Как свидетельствует опыт строительства, при проектировании мелиоративных сооружений необходимо уделять серьезное внимание изучению современных геологических процессов для обоснования схем инженерной защиты территорий и выбора мероприятий по борьбе с этими процессами. Возникает необходимость выявления территорий, пораженных теми или иными экзогенными процессами, оценки степени их пораженности и прогноза развития. При характеристике инженерно-геологических условий эти процессы могут оказать решающее влияние на выбор путей мелиоративного освоения территории.

Конструктивное решение элементов мелиоративных систем во многом определяется типом грунтовых толщ. Характер взаимодействия элементов систем и грунтовых толщ влияет на надежность в эксплуатации и выбор противофильтрационных мероприятий. Большое значение имеют вопросы оценки грунтовых условий по необходимости современной дождевальной техники, а также прогноза деформаций и разрушения грунта при орошении.

Предлагаемый набор компонентов инженерно-геологических условий обоснован для Центральной Кахетии и может изменяться при районировании других территорий (в сейсмически неоднородных активных областях, в областях развития многолетнемерзлых пород и т. д.).

Совершаемый после отбора важнейших признаков логический переход достаточно однозначен, т. е. в следующем блоке должны производиться планирование всех последующих действий и принятие решений об оптимальных способах их реализации. Этот этап формализовать невозможно, он выполняется исключительно логически.

Согласно описываемой методике, предполагается использование типологических таксономических единиц трех уровней: областей, подобластей и районов (название таксонов условно и не соответствует аналогичным единицам общего инженерно-геологического районирования). Выделение областей проводится по данным о прогнозных глубинах залегания грунтовых вод. В зависимости от полученных результатов рекомендуются оптимальные глубины и способы строительства дренажной сети, определяются сроки ее сооружения. Подобласти выделяются на основе данных, определяющих «поверхностные» условия строительства и функционирование мелиоративных систем. Районы же выделяются согласно предварительно составленной схеме распространения типов грунтовых толщ.

После определения содержания блока «планирование» совершается переход к реализации намеченной программы действий — логическому блоку выделения таксонов первого порядка — областей и затем блоку выделения таксонов второго порядка — подобластей, проводимый с учетом таких признаков, как крутизна склонов, интенсивность горизонтального расчленения и пораженность территории экзогенными геологическими процессами<sup>1</sup>. При типизации территорий, учитывающей эти признаки, применялись алгоритмы кластерного анализа, которые использовались при решении задачи классификации в нефтегазовой геологии [2, 3], стратиграфии, петрографии, геохимии [4], инженерной геологии [5]. В случае простого наложения этих параметров, принимая, что каждый из них имеет  $n$  градаций, выделялось бы  $n^3$  типов «поверх-

<sup>1</sup> Вычисление средних углов наклона, интенсивности горизонтального расчленения, коэффициента площадной пораженности экзогенными геологическими процессами производится по общепринятым методикам.

ностных» условий. Так, при  $n=6$  количество выделяемых типов условий достигало бы 216. Применение кластер-анализа позволяет обоснованно уменьшить их количество путем выделения в исходном массиве трехмерных векторов ряда однородных групп — кластеров. При этом предполагается, что каждый кластер включает в себя объекты, в некотором смысле более близкие, чем объекты из других кластеров.

Этот логико-формальный блок имеет сложное строение и включает в себя ряд логико-формальных операций, первая из которых — представление признаков в количественной форме. Логическим путем определяется конкретная методика их преобразования, после чего признаки формально переводятся в количественную форму.

Переход к следующей операции — нормированию рассматриваемых признаков — является обязательным, так как все они имеют различные размерности и масштабы измерений и без соответствующих преобразований в единую систему относительных величин не могут быть использованы. Нормирование проводилось по формуле  $R_n = \bar{R}/R_{\max}$ , где  $R_n$  — нормированное значение показателя;  $\bar{R}$  — значение показателя;  $R_{\max}$  — максимальное значение показателя в пределах исследуемой территории.

Для дальнейшей математической обработки аналитические карты, представляющие двухмерные поля компонентов инженерно-геологических условий, необходимо представить в виде дискретной цифровой модели. Это осуществляется путем формального аналого-цифрового преобразования графической информации в цифровую форму, пригодную для прямого ввода в ЭВМ, с помощью специального электронно-механического устройства — цифрователя (дигитайзера), позволяющего фиксировать координаты точек на планшете цифрователя. Границы контуров на карте расчленяются на отдельные сегменты, концами которых являются так называемые узловые точки, в которых сочленяются три и более граничных линий. Между двумя узловыми точками фиксируются координаты текущих точек. Это позволяет аналитически монтировать контуры площадей из нужных сегментов, стыкуя их концы.

В дальнейшем проводится автоматическое деление карт на элементарные территориальные единицы, т. е. практически полученный массив координат точек — границ контуров на карте и кодов контуров с определенным шагом — преобразуется в двухмерный массив кодов. Для этого преобразования принимается, что точки с известными координатами соединены между собой отрезками прямых линий, и с определенным шагом производится вычисление координат лежащих на них точек. После этого при минимальном фиксированном значении одной координаты просматриваются точки в направлении второй координаты, и точкам, лежащим между двумя границами, присваивается значение кода контура. Затем значение первой координаты увеличивается и просмотр возобновляется по второй координате. Описанная процедура повторяется до тех пор, пока первая координата не достигнет своего максимального значения. В результате одномерный массив координат точек и кодов контуров преобразуется в двухмерный массив кодов с определенным шагом разбиения. Этую операцию можно оценивать как логико-формальную, т. е. шаг разбиения выбирается логическим путем, а все остальные действия осуществляются совершенно строго. В результате обработки трех карт компонентов, определяющих «поверхностные» условия функционирования мелиоративных систем, мы получаем три двухмерные матрицы компонентов инженерно-геологических условий, из которых на следующем этапе строится трехмерная матрица.

Разбиение множества объектов на кластеры производится в зависимости от меры близости двух объектов, в качестве которой принято евклидово расстояние в трехмерном пространстве признаков. Критерием отнесения данного объекта к тому или иному кластеру служит величи-

на расстояния от него до центра кластера. Центром кластера является вектор  $\mathbf{z}$ , образующийся по правилу

$$\mathbf{z} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{x}_i, \quad i = 1, 2, \dots, k,$$

где  $\mathbf{x}_i$  — векторы, соответствующие объектам, входящим в данный кластер;  $k$  — число объектов в кластере.

Программа реализована согласно следующей логике<sup>2</sup>. Первый вектор из массива  $X$  принимается за центр первого кластера  $\mathbf{z}_1 = \mathbf{x}_1$ . Просматриваются остальные векторы из массива  $X$ . Вычисляется расстояние между очередным вектором  $\mathbf{x}_i$  и центрами всех существующих в данный момент кластеров  $\mathbf{z}_k$ . Если все расстояния оказываются больше заданного порога  $R$ , то учреждается новый кластер с центром  $\mathbf{z}_{NCl+1} = \mathbf{x}_i$ . В противном случае вектор  $\mathbf{x}_i$  приписывается к тому кластеру, чей центр к нему ближе. После этого производится пересчет центра кластера.

Проводится проверка на минимальную «заселенность» кластера. Кластеры, количество точек в которых меньше порогового значения, расформировываются, и составляющие их точки распределяются поближайшим кластерам со значением «заселенности» больше минимального. Поскольку пороговое расстояние и минимальная «заселенность» оказывают непосредственное влияние на количество и компактность кластеров, то выбор их значений, естественно, должен быть обоснован.

Для обоснования оптимального порогового расстояния при различных его значениях повторяется кластер-анализ исходного объема данных. На основании результатов проведенных расчетов строится график зависимости количества кластеров от порогового расстояния. Наличие кривой горизонтальных участков свидетельствует о существовании устойчивых комбинаций признаков, т. е. о разбиении трехмерного пространства признаков на реально существующие кластеры. Координаты центров масс этих кластеров и будут средними значениями признаков в них. Выделение подобластей производится в соответствии с площадным распространением кластеров.

Этот алгоритм, несмотря на некоторые присущие ему недостатки (влияние на результаты порядка просмотра объектов и порогового значения минимальной «заселенности»), позволяет просто и быстро получить оценку структуры заданного набора признаков, а затем выделить подобласти на основании данных о площадном распространении кластеров.

Типологические инженерно-геологические районы выделяются в соответствии с предварительно составленной схемой типизации грунтовых толщ. Логическая схема описываемой методики приведена на рис. 1.

При проведении районирования Центральной Кахетии было выделено четыре типа областей с глубиной залегания грунтовых вод 0—1,5 м ( $A$ ), 1,5—3 ( $B$ ), 3—5 ( $B$ ) и более 5 м ( $G$ ) (табл. 3). Выделение подобластей проводилось на основе анализа трехмерной матрицы, сформированной из трех двухмерных массивов. Эти массивы в свою очередь были получены при разбиении двух карт морфометрических показателей и карты пораженности экзогенными геологическими процессами на квазиоднородные элементарные территориальные единицы площадью 1  $\text{мм}^2$  (0,04  $\text{км}^2$ ). Затем 14 раз с различным пороговым расстоянием был проведен кластер-анализ с числом-ограничителем минимальной «заселенности» кластеров, равным 5000, в результате чего кластеры, занимающие менее 3,3% площади карты, расформировывались. По данным расчетов был построен график зависимости числа выделяемых кластеров от порогового расстояния (рис. 2). При максимальных пороговых

<sup>2</sup> Алгоритм реализован Г. А. Алферовым.

Отбор значимых компонентов инженерно-геологических условий



Выбор системы таксономических единиц и алгоритмов их выделения



Выделение областей по глубинам залегания грунтовых вод



Выделение подобластей по крутизне склонов, интенсивности горизонтального расчленения и пораженности территории экзогенными геологическими процессами

Представление признаков в количественной форме



Нормирование признаков



Оцифровка карт



Разбиение карт на элементарные территориальные единицы и формирование двухмерных матриц



Формирование трехмерной матрицы



Проведение кластер-анализа трехмерной матрицы с различными пороговыми расстояниями



Отбор наиболее устойчивой совокупности кластеров и выделение на их основе подобластей



Выделение районов по типам грунтовых толщ



Построение схемы инженерно-геологического районирования

Рис. 1. Логическая схема среднемасштабного инженерно-геологического районирования для целей мелиоративного строительства

расстояниях ( $R=60-70$ ) число выделенных кластеров было равно 4. При уменьшении порогового расстояния от 50 до 20 количество кластеров постоянно равнялось 6. При уменьшении порогового расстояния от 20 до 7 в результате расщепления кластеров количество их увеличивалось до 9. Такое же количество кластеров выделялось при пороговом расстоянии  $R=5$ . При дальнейшем уменьшении порогового расстояния происходит массовое расщепление кластеров, но в результате действия числа-ограничителя минимальной «заселенности» новые кластеры со-

Таблица 1

## Типы подобластей и соответствующие им средние значения признаков

Тип подобласти	Крутизна склона (среднее значение в градусах)	Интенсивность горизонтального расчленения (среднее значение в км/км <sup>2</sup> )	Пораженность экзогенными геологическими процессами (среднее значение в долях единицы)
I	2	0,25	0,03
II	2	0,35	0,75
III	16	0,80	0,05
IV	16	0,80	0,4
V	16	0,80	0,75
VI	32	0,35	0,05

единялись в семь групп. Таким образом, на основе анализа графика можно сделать вывод о том, что наиболее стабильные сочетания признаков выделяются при пороговом расстоянии  $R=20-50$ .

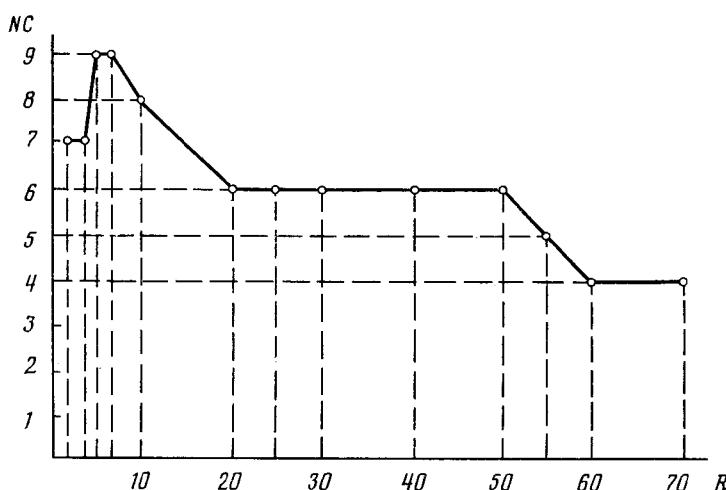


Рис. 2. График зависимости числа выделяемых кластеров  $NC$  от порогового расстояния  $R$

При рассмотрении средних нормированных значений признаков соответствующих кластеров и их «заселенности» на этом интервале было видно, что наиболее постоянен состав кластеров при пороговом расстоянии 20—30. В связи с этим результаты кластеризации при  $R=25$  принимаются за наиболее стабильные. В соответствии с ними и проводится выделение типов подобластей. Средние значения признаков в них определяются координатами соответствующих центров масс. Таким образом, в результате расчетов было выделено шесть типов подобластей и получены средние значения признаков в них (табл. 1).

К I типу подобластей относятся долины рек Алазань, Иори, Кура и долины их основных притоков (за исключением пойм), а также большая часть Куринской равнины и наиболее пологие части Гаре-Кахетинского плоскогорья; II тип — предгорья и поймы рек, в пределах которых возможны частые паводки и сели; III тип — интенсивно расчлененные участки Гаре-Кахетинского плоскогорья, в пределах которых экзогенные процессы развиты слабо; IV тип — интенсивно расчлененные участки Гаре-Кахетинского плоскогорья и Цив-Гомборского хребта, в пределах которых коэффициент пораженности экзогенными процессами (оползни и сели) достигает 0,4; V тип близок к IV, но к нему относятся также

Таблица 2

## Схема типизации грунтовых толщ Центральной Кахетии

Надкласс	Класс	Группа	Тип
Сложенные грунтами одного класса	Скальные Дисперсные	Однородные Однородные Двухпородные	1. Скальные 2. Крупнообломочные 3. Лесовые 4. Глинистые 5. Крупнообломочные и песчаные с преобладанием крупнообломочных 6. Крупнообломочные и глинистые с преобладанием крупнопородных 7. Глинистые и крупнообломочные с преобладанием глинистых 8. Глинистые и песчаные с преобладанием глинистых 9. Глинистые с крупнообломочными и песчаными с преобладанием глинистых
Сложенные грунтами различных классов	Дисперсные, подстилаемые скальными	Двухпородные	10. Глинистые и скальные с преобладанием глинистых 11. Скальные и крупнообломочные с преобладанием скальных 12. Скальные и глинистые с преобладанием скальных
		Многородные	13. Скальные с крупнообломочными и глинистыми с преобладанием скальных

предгорья Южного склона Большого Кавказского хребта, территории с широко развитыми экзогенными процессами с коэффициентом пораженности 0,75; к VI типу отнесены участки с крутизной склонов более 30°, в связи с мелиоративным строительством их в настоящее время не рассматриваются.

При анализе грунтовых условий было выделено 13 типов грунтовых толщ, причем при их обосновании учитывались только признаки, отражающие особенности их состава и строения, подразделенные на четыре иерархических уровня. Иерархическое положение получаемых таксонов представлено в табл. 2. При этом как однородные выделялись грунтовые толщи, не менее 95% мощности которых сложено двумя породами, причем мощность каждой породы составляет не менее 5% общей мощности грунтовой толщи. Как многородные обосновывались грунтовые толщи, сложенные тремя и более типами грунтов. Результаты систематизации территориальных таксономических единиц по комплексу признаков приведены в табл. 3.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве мелиоративных систем в Центральной Кахетии. Предложенная методика районирования может быть также использована при проведении районирования для других видов строительства при соответствующем наборе исходных компонентов инженерно-геологических условий.

Таблица 3

**Систематика территориальных таксономических единиц  
типовогического районирования Центральной Кахетии  
по комплексу признаков для целей мелиоративного строительства**

Область	Подобласть	Район
<i>A</i> (0—1,5 м)	I II	2, 3, 11 5, 8
<i>B</i> (1,5—3 м)	I II III IV VI	2, 3, 8, 13 2, 3 9, 11, 12, 13 1 6, 10, 12
<i>B</i> (3—5 м)	I II III V VI	2, 3, 6, 7, 8, 11, 13 2 2, 10, 13 7 12
<i>Г</i> (>5 м)	I II III IV V VI	2, 3, 6, 8, 9, 10, 13 2, 3, 6, 7, 10, 11 2, 7, 10, 11, 12, 13 1, 7, 10, 12, 13 1, 3, 7, 10, 12 1, 9, 10, 12, 13

*Примечание.* Номера типов подобластей соответствуют табл. 1; номера типов грунтовых толщ — табл. 2. Номера типов грунтовых толщ расположены горизонтально только из соображений компактности, нормальное расположение — вертикальное.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Балаев Л. Г. Инженерно-геологическое районирование для целей мелиорации//Материалы межведомственного совещания по мелиоративной гидрогеологии и инженерной геологии. Вып. III. М., 1972. С. 94—97.
2. Дементьев Л. Ф. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1983. 189 с.
3. Каналин В. Г., Дементьев Л. Ф. Методика и практика выделения эксплуатационных объектов на многопластовых нефтяных месторождениях. М.: Недра, 1982. 224 с.
4. Лаудон Т. ЭВМ и машинные методы в геологии. М.: Мир, 1981. 318 с.
5. Рященко Т. Г. Опыт применения кластер-анализа при инженерно-геологических исследованиях//Инж. геология. 1980. № 3. С. 108—115.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию  
3.IV.1986,

УДК 624.620.192.47

ТОЛКАЧЕВ М. Д., ПОЛИКАРПОВ А. И., РУМЯНЦЕВА Н. А.,  
КОВБАСА С. И.

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА  
ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПЕСЧАНИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

Существующие методы изучения коллекторских и фильтрационных свойств горных пород позволяют получить представление об их газо- и водопроницаемости, объеме порового пространства и степени его сообъемности. Традиционные методы оптической и электронной микроскопии дают общие представления о структуре порового пространства (размерах и форме пор, их количестве и т. д.). Однако в силу специфики приготовления препаратов получаемая с помощью этих методов информация может оказаться недостаточно полной, а иногда и существенно искажающей реальную картину структуры порового пространства, что, естественно, затрудняет использование получаемых данных.

В настоящей работе рассматривается применение некоторых новых методов изучения структуры порового пространства к решению конкретной инженерно-геологической задачи.

При определении возможности подземного сброса промстоков ПО «Белорускалий» было установлено, что наиболее перспективны для этих целей отложения старооскольского горизонта среднего девона и пинской свиты верхнего протерозоя, которые представлены близкими по составу пестроцветными песчаниками, чередующимися с относительно маломощными пластами глин [2, 9].

Песчаники относятся к аркозо-олигомиктовому типу и сложены в основном кварцем (50—80%) и калиевым полевым шпатом (15—40%). В незначительном количестве в них присутствуют литокласты (1,5—8%), плагиоклаз (до 1,5%), хлорит и слюды (до 1%). Характер заполнения межзернового пространства в рассматриваемых породах различен. Даже в одном образце можно обнаружить участки с контактовым, пленочным или поровым типом цементации. Связующая масса практически не раскристаллизована и сложена преимущественно тонкодисперсным железисто-глинистым материалом, составляющим тонкоалевритовую (0,005—0,01 мм) и пелитовую (мельче 0,005 мм) фракции. Глинистые минералы представлены либо одной гидрослюдой (пинская свита), либо гидрослюдой и каолинитом (старооскольский горизонт). Кроме них в пелитовых фракциях постоянно устанавливаются кварц, полевые шпаты и гематит. По гранулометрическому составу и содержанию цемента песчаники можно разделить на три группы: 1) тонкомелковзернистые<sup>1</sup> с содержанием цемента до 5—6%; 2) тонкозернистые с содержанием цемента до 6—7%; 3) тонкозернистые с содержанием цемента от 13 до 30%.

Песчаникам первой группы, сложенным относительно крупными обломками ( $M_d=0,09—0,14$  мм) и отличающимся наибольшей разнозернистостью ( $S_0=1,30—1,50$ ), свойственно и наиболее рыхлое сложение. Оно обусловлено незначительной протяженностью поверхностей сопри-

<sup>1</sup> Под тонко- и мелковзернистыми песчаниками подразумеваются породы, в которых преобладают фракции 0,05—0,1 и 0,1—0,25 мм соответственно.

Таблица 1

**Газопроницаемость и открытая пористость песчаников старооскольского горизонта и пинской свиты**

Литологическая характеристика песчаников	Газопроницаемость * K, мД	Открытая пористость** покр., %
Тонкомелкозернистые с содержанием цемента до 5—6%	1200—2000	27—30
Тонкозернистые с содержанием цемента 6—7%	500—1500	22—29
Тонкозернистые с содержанием цемента 13—30%	10—400	13—15

\* Значения K приведены только для направлений, параллельных напластованию, совпадающих [с направлением движения рассолов].

\*\* Открытая пористость песчаников составляет 95—98% от общей.

косновения обломков, низким содержанием алевропелитового материала, преимущественно контактовым или пленочно-контактовым типом цемента и соответственно крупными размерами пор.

Песчаники второй группы, отличающиеся лучшей отсортированностью ( $S_0 = 1,20—1,30$ ;  $M_d = 0,07—0,08$ ), имеют значительно более плотную упаковку обломочных зерен. Несмотря на то что содержание цементирующего материала здесь такое же, как и в песчаниках первой группы, наиболее характерным типом цемента является порово-пленоочный и, как правило, без полного заполнения межзернового пространства.

Песчаники третьей группы при той же размерности обломочного материала, что и во второй, отличаются повышенным содержанием алевропелитового материала, который почти полностью заполняет поровое пространство (пленоно-поровый и поровый тип цемента). В результате этого пористость здесь в значительной мере определяется структурой цементирующей массы.

Значения газопроницаемости и открытой пористости песчаников приведены в табл. 1. Согласно существующим классификациям [12, 13], коллекторские свойства исследуемых пород могут быть охарактеризованы как очень хорошие (группа 1 и 2) и хорошие (группа 3). Однако для описания песчаников как фильтрующей среды такой оценки недостаточно. Необходимые параметры структуры порового пространства (размер пор, их форма, извилистость и т. д.) можно получить, используя методы непосредственного наблюдения.

Наиболее эффективными системами получения и количественного анализа изображения структуры порового пространства горных пород является комплекс, состоящий из растрового электронного микроскопа (РЭМ) и микроЭВМ [10]. В данной работе использовались РЭМ-NITACHI S-800 и микроЭВМ «Искра-226», снабженная специальной программой анализа морфологии микрообъектов.

Из-за большой глубины фокуса электронно-микроскопических изображений границы между порами и минеральными частицами на снимках никогда не бывают четкими, а представляют собой полутоновые переходы от темных участков к светлым. В рассматриваемом случае темные участки соответствуют глубоким зонам пор, полутоновые — приповерхностным их частям, а светлые — зернам песчаника.

Естественно, что проводить количественную оценку порового пространства при такой градации весьма затруднительно. Поэтому разделение проводится условно, путем установления уровня дискриминации изображений по максимальному градиенту падения яркости. Получаемая таким образом модель структуры содержит только две градации яркости — черную и белую — и является наиболее информативным бинарным описанием полутонового изображения, обладая максимальной устойчивостью по отношению к помехам и случайным колебаниям уровня дискриминации [6].

При количественном анализе порового пространства, проводимом по одной поверхности скола образца, значительные погрешности возникают также за счет появления «ложных пор», связанных с удалением тех зерен, которые остаются на второй поверхности скола. Чтобы исключить или уменьшить погрешности такого рода, авторами использовался метод «сопряженных поверхностей», при котором изучаются обе поверхности скола образца [7, 8, 14, 15]. Количественная оценка порового пространства в этом случае проводится на основе анализа изображений каждой (первой и второй) из поверхностей и их совмещенного изображения.



Рис. 1. Характер порового пространства исследуемых песчаников. Увел. 400

Раздельное изучение каждой из сопряженных поверхностей скола дает более достоверное представление о структуре породы и ее поровом пространстве. При исследовании рассматриваемых песчаников было установлено, в частности, что во всех трех их типах поровое пространство представляет собой систему глубоких изометрических пор различного размера, соединенных вытянутыми щелевидными каналами (рис. 1). По форме эти поры можно классифицировать как сферические и канальные соответственно [11]. Если же исходить из функционального назначения песчаников как пород-коллекторов для закачиваемых промстоков, то эти два типа пор можно условно назвать емкостными и фильтрующими.

Рассмотрим более подробно результаты, которые получаются при применении метода сопряженных поверхностей для изучения структуры порового пространства песчаников. На рис. 2, а представлено схематическое изображение единичной емкостной поры. На РЭМ-изображении глубинная часть такой поры выглядит в виде черного, а ее мелкие части («борта») и подводящие каналы — в виде серого тона (рис. 2, б). Представим себе, что на верхний слой зерен этой части образца ложится следующий, принадлежащий второй части (рис. 2, в, г), и они скрепляются между собой глинистым цементом, как бы восстанавливая структуру образца до раскалывания (рис. 2, д, е). Ясно, что емкостная пора, перекрытая вышележащими зернами, может несколько измениться в объеме, но сообщаясь с другими емкостными порами будет только через фильтрующие каналы. На результирующем изображении, полученном при наложении изображений двух поверхностей скола, как и на одиночных, также наблюдаются три градации плотности почернения, но характеризуют они иные структурные элементы породы. Светлые участки соответствуют областям плотного примыкания зерен двух контактирующих монослоев, полутоновые — областям неплотного примыкания

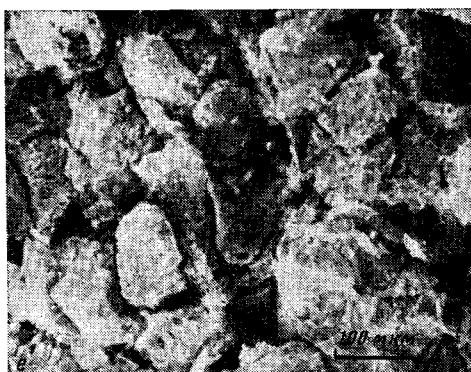
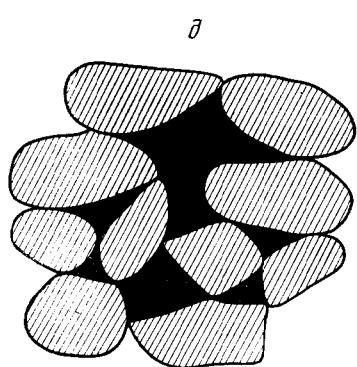
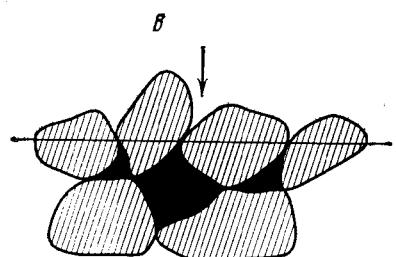
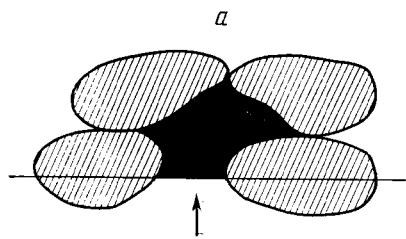


Рис. 2. Схемы (*а, в, д*) и соответствующие РЭМ-изображения (*б, г, е*), иллюстрирующие применение метода сопряженных поверхностей для изучения структуры порового пространства песчаников. Увел. 200. Черные поля на схемах — поровое пространство, заштрихованные — зерна песчаника. Горизонтальными линиями отделены видимые в РЭМ части поверхностей сколов образцов. Стрелкой на схемах показано направление фоторегистрации. См. пояснения в тексте

зерен, а также определенной части фильтрующих каналов и мелких пор, темные — тем порам, которые непосредственно переходят из одного монослоя в другой. Таким образом, анализ совмещенных изображений дает возможность реконструировать характер порового пространства на контакте двух монослоев зерен песчаника и выделить пористость, обеспечивающую связь между ними.

Наиболее важной характеристикой, получаемой в результате количественного анализа изображений, является распределение пор по раз-

мерам. Однако для того чтобы получить полное представление о размерах пор, присущих исследуемому образцу, необходимо проанализировать изображения, полученные либо при оптимальном<sup>2</sup> увеличении, либо, если это невозможно, при нескольких. Во втором случае возникает задача соединения информации, получаемой на разных уровнях. Для ее решения необходимо воспользоваться методикой, изложенной в работах [3–5].

При исследовании песчаников всех трех групп первоначально анализировались поры размерами от первых микрон и более. Однако при анализе образцов первой группы было установлено, что увеличение 200 позволяет получить распределение пор по размерам от 3,5 до 110 мкм, но не позволяет оценить поры размерами более 110 мкм, представляющие особый интерес с точки зрения коллекторских свойств. Переход от увеличения 200 к 100 привел к существенному увеличению поля зрения. Гистограмма, построенная для масштаба при увеличении 100, характеризует распределение пор по размерам от 7 до 220 мкм. При анализе изображения того же участка при увеличении 50 было установлено, что пор размерами более 220 мкм в образце нет. Очевидно, что получить полное представление о распределении пор по размерам во всем интересующем диапазоне (от 3,5 до 220 мкм) можно «сшивая» гистограммы. Единственная возможность проведения такой операции представляется, как показано в работе [4], только в том случае, когда структура образца признана однородной и изотропной. Поэтому первый этап по «сшивке» гистограмм — оценка степени однородности и изотропности распределения пор по размерам в изображении<sup>3</sup>. Оказалось, что для уровня значимости  $\alpha=0,1$  (или, что то же, для надежности 0,9) распределение пор по размерам для увеличения 100 и 200 может быть признано однородным и изотропным. Это позволило оценить число пор класса 3,5—7 мкм, содержащихся в структуре песчаника, на площади, соответствующей увеличению 100, но не «видимых» при этом увеличении<sup>4</sup>. Число таких пор равно числу пор этого класса, содержащихся в поле зрения при увеличении 200, умноженному на коэффициент, равный отношению полей зрения при увеличениях 100 и 200, т. е. на 4.

В итоге получим гистограмму, характеризующую распределение пор песчаника по размерам в интервале от 3,5 до 220 мкм (рис. 3)<sup>5</sup>.

Для наглядности приведем таблицу, указывающую процентное содержание пор каждого класса (табл. 2). Из табл. 2 видно, что в песчанике первого типа преобладают поры размерами от 55 до 220 мкм (~80%).

Аналогичная обработка, проведенная для совмещенных изображений, полученных при тех же увеличениях (200 и 100), дала объединенную гистограмму, представленную на рис. 4 (процентное содержание пор приведено в табл. 2). Заметим, что в этом случае поровое пространство было признано однородным и изотропным с надежностью 0,95.

Сопоставление полученных данных показывает, что наибольшее число пор теперь сосредоточено в интервале от 27 до 110 мкм (~74%). Это свидетельствует о том, что при совмещении «исчезает» класс самых крупных пор размерами от 110 до 220 мкм, которые, как уже отмечалось, перекрываются вышележащими зернами песчаника. Вся гистограмма смещается в область меньших размеров, что происходит за счет «перекрытия» и определенной части фильтрующих пор.

<sup>2</sup> Под оптимальным подразумевается увеличение, обеспечивающее возможность статистической оценки интересующего структурного элемента в выбранном интервале размеров.

<sup>3</sup> Понятие однородности и изотропности структуры порового пространства введено в работе [3] и распространяется только на интересующий интервал размеров пор.

<sup>4</sup> Элемент дискретизации дисплея микроЭВМ «Искра-226» равен 6,87 мкм для увеличения РЭМ 100 раз и 3,43 — для 200.

<sup>5</sup> Размеры пор на гистограммах представлены эквивалентными диаметрами.

Таблица 2

Процентное содержание пор на раздельных и совмещенных изображениях поверхностей скола образцов песчаника первой группы

Класс размеров, мкм	Содержание пор в классе, %	
	по раздельным изображениям	по совмещенным изображениям
3,5—7	4	9
7—14	2	4
14—27	4	13
27—56	12	24
56—110	40	50
110—220	38	—

При переходе к песчаникам второй и третьей групп, имеющих более тонкий гранулометрический состав и соответственно несколько меньшие размеры пор, полное количественное описание структуры порового пространства можно провести при одном оптимальном увеличении 200, которое охватывает весь класс размеров пор, представляющих интерес для решения поставленной задачи.

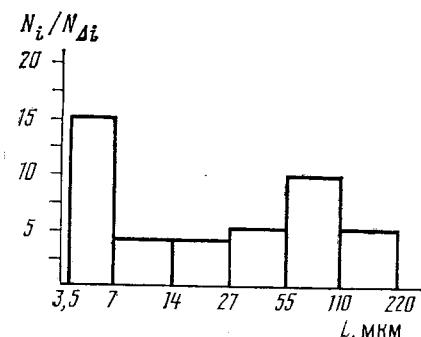


Рис. 3

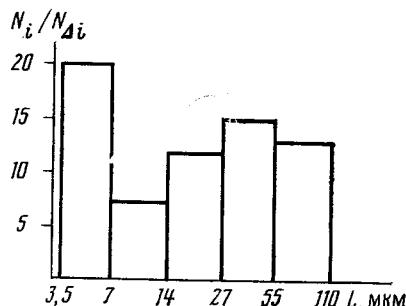


Рис. 4

Рис. 3. Гистограмма распределения пор по размерам в песчаниках первой группы, являющаяся результатом «сшивки» двух гистограмм, полученных путем анализа одиночных изображений при увеличениях 200 и 100

Рис. 4. Гистограмма распределения пор по размерам в песчаниках первой группы, являющаяся результатом анализа совмещенных изображений, полученных при увеличениях 200 и 100

Гистограммы распределения пор по размерам, характерные для образцов мелкозернистого песчаника и полученные при анализе раздельных изображений при увеличении 200, содержат поры в интервале размеров от 3,5 до 110 мкм. В песчаниках второй группы отсутствуют поры 110—220 мкм, а в образцах третьей группы — 55—110 мкм. Процентные содержания пор каждого класса (раздельные изображения) приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, основную массу в песчаниках второй группы составляют поры размерами 27—110 мкм ( $\sim 80\%$ ), а в третьей — 14—55 мкм ( $\sim 72\%$ ).

В гистограммах, полученных для образцов песчаников второй группы по совмещенным изображениям, не содержится пор класса 55—110 мкм, а в образцах третьей группы произошло перераспределение пор по размерам. Процентное содержание пор каждого класса показано в табл. 3.

Таблица 3

**Процентное содержание пор на раздельных и совмещенных изображениях поверхностей скола образцов песчаника второй и третьей групп**

Класс размеров, мкм	Содержание пор в классе, %			
	вторая группа песчаников		третья группа песчаников	
	раздельные изображения	совмещенные изображения	раздельные изображения	совмещенные изображения
3,5—7	2	5	10	23
7—14	6	12	18	39
14—27	11	39	34	27
27—55	46	44	38	11
55—110	35	—	—	—

Таблица 4

**Результаты анализа пористости и среднего диаметра пор, полученные при обработке раздельных и совмещенных изображений образцов песчаников трех групп**

Группа	Пористость, %			Средний диаметр пор, мкм	
	открытая пористость $n_{откр}$	по раздельным изображениям	по совмещенным изображениям	по раздельным изображениям	по совмещенным изображениям
Первая	27—30	20—26	10—14	33—36	13—23
Вторая	22—29	17—25	9—12	20—30	10—15
Третья	13—15	15—18	5—7	17—24	7—13

Сравнительный анализ свидетельствует, что, так же как и в образцах первой группы, при совмещении гистограммы смещаются в область меньших значений пор. Основная масса пор в образцах второй группы сосредоточена в области 15—55 мкм, а в третьей — 7—27 мкм. В случае необходимости более точного выделения размеров преобладающих пор целесообразно провести анализ изображений внутри областей наибольшего сосредоточения пор.

Проанализируем данные, полученные при обработке раздельных и совмещенных изображений образцов песчаников всех трех групп, по таким параметрам, как пористость и средний диаметр пор<sup>6</sup> (табл. 4).

Обращает на себя внимание близость величин открытой пористости и пористости, полученной при анализе раздельных изображений. Представляется, что это не случайное совпадение и объяснить его можно следующим образом. Как было отмечено выше, структура порового пространства исследуемых песчаников определена с высокой степенью надежности как однородная и изотропная, что позволяет получить представительную информацию о размерах и содержании пор, обходясь либо «шивкой» гистограмм, полученных в результате обработки изображений при двух увеличениях (первая группа образцов), либо даже одним увеличением (вторая и третья группы).

### Выводы

1. Поровое пространство исследованных песчаников представляет собой систему изометричных пор, соединенных между собой вытянутыми щелевидными каналами; первые определяют в основном емкостные свойства песчаников, вторые — их фильтрующую способность.

<sup>6</sup> Средний диаметр пор плохо отражает всю сложность геометрии порового пространства и практически применим только при переходе от реальной среды к идеальной [1].

2. Определение традиционных коллекторских параметров — пористости и газопроницаемости — не дает полного представления о перспективности выбранных пород для закачки и требует проведения исследований для установления характера структуры порового пространства и оценки размеров фильтрующих пор.

3. Примененный в данной работе метод «сопряженных поверхностей» позволяет выделить и оценить фильтрующую пористость песчаников, которая в 2—2,5 раза меньше величины открытой пористости.

4. Для снижения процесса кольматирования призабойных зон поглощающих скважин очистку закачиваемых рассолов от взвешенной твердой фазы следует проводить до такой степени, чтобы размеры частиц были существенно меньше размеров фильтрующих каналов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. С. 61.
2. Богомолов Г. В., Ротькин С. М., Бабий Л. Г. и др. Литолого-тектонические и гидрогеологические предпосылки безопасного захоронения избыточных сточных вод ПО «Белорускалий» в глубокие поглощающие горизонты. — В сб.: Охрана окружающей среды калийных производств. Минск: Наука и техника, 1979, с. 71—80.
3. Ковбаса С. И., Толкачев М. Д., Соколов В. Н. Статистический метод исследования порового пространства горных пород по изображениям. — Инж. геология, 1983, № 3, с. 36—44.
4. Ковбаса С. И., Соколов В. Н., Толкачев М. Д. Количественная интегральная оценка структурных параметров трещинно-порового пространства по изображениям. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1984, т. 48, № 12, с. 2423—2426.
5. Ковбаса С. И., Соколов В. Н., Толкачев М. Д. Особенности использования статистического метода интегральной оценки структуры дисперсных горных пород по их РЭМ-изображениям. — Тез. докл. 4-го Всес. симпоз. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. «РЭМ-84». Звенигород. 222 с.
6. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Т. 2./Под ред. Сергеева Е. М. М.: Недра, 1983, с. 194—195.
7. Миркин Г. Р., Осипов В. И., Соколов В. Н., Толкачев М. Д. Устройство для определения величины пористости и количественной оценки структуры порового пространства твердых тел. А. с. № 728056 (СССР). Б. И. № 14, 1980.
8. Осипов В. И., Соколов В. Н., Толкачев М. Д., Миркин Г. Р., Румянцева Н. А. Электронно-микроскопические исследования порового пространства твердых тел методом сопряженных поверхностей. — Тез. Всесоюз. конф. «РЭМ-78». Звенигород, 1978.
9. Ротькин С. М., Шлендова Т. К. Перспективы поисков поглощающих водоносных горизонтов в Припятской впадине. — Труды ВНИИГ. Геология месторождений калийных солей и их разведка. Л.; 1973, с. 134.
10. Сасов А. Ю., Соколов В. Н. Цифровая обработка РЭМ-изображений. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1984, т. 48, № 12, с. 2389—2396.
11. Стрелов К. К. Структура и свойства оgneупоров. М.: Металлургия, 1982, с. 61.
12. Ханин А. А. Петрофизика нефтяных пластов. М.: Недра, 1976, с. 37.
13. Ханин А. А. Породы — коллекторы нефти и газа нефтегазоносных провинций СССР. М.: Недра, 1973, с. 43.
14. Osipov V. I., Sokolov V. N., Tolkaчев M. D. The use of scanning electron microscope for the investigation of properties of porous bodies. Scanning electron microscopy in the study of sediments. Norwich, England, 1978.
15. Osipov V. I., Sokolov V. N., Tolkaчев M. D. The electron microscopic studies of pore space by a method of conjugate surfaces. — J. microscopy, 1980, december v. 20, p. 3.

Всесоюзный научно-исследовательский  
и проектный институт галургии

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
24.VI.1985



## Редакционная коллегия:

Главный редактор  
академик АН СССР  
Е. М. СЕРГЕЕВ

Доктор геолого-минералогических наук  
И. П. ЗЕЛИНСКИЙ

Зам. главного редактора  
член-корреспондент АН ГрузССР  
И. М. БУАЧИДЗЕ

Доктор геолого-минералогических наук  
Ф. В. КОТЛОВ

Зам. главного редактора доктор  
геолого-минералогических наук  
В. И. ОСИПОВ

Доктор геолого-минералогических  
наук  
В. Д. ЛОМТАДЗЕ

Зам. главного редактора  
член-корреспондент АН СССР  
П. Ф. ШВЕЦОВ

Академик АН УзССР  
Г. А. МАВЛЯНОВ

Ответственный секретарь кандидат  
геолого-минералогических наук  
Е. Н. ОГОРОДНИКОВА

Доктор технических наук  
Г. А. МАРКОВ

Академик ВАСХНИЛ  
Л. Г. БАЛАЕВ

Член-корреспондент АН СССР  
В. П. СОЛОНЕНКО

Академик АН БССР  
Г. И. ГОРЕЦКИЙ

Член-корреспондент АН АрмССР  
Г. И. ТЕР-СТЕПАНЯН

Доктор географических наук  
Н. А. ГРАВЕ

Доктор геолого-минералогических наук  
А. С. ХАСАНОВ

## Адрес редакции:

103717, ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21  
Телефон: 227-01-45

Заведующая редакцией А. А. Мазаева

Технический редактор Л. В. Павлова

Сдано в набор 23.04.87      Подписано к печати 08.06.87      Т-05574      Формат бумаги 70×108<sup>1/16</sup>  
Высокая печать      Усл. печ. л. 9,8      Усл. кр.-отт. 23,1 тыс.      Уч.-изд. л. 10,6      Бум. л. 3,5  
Тираж 2298 экз.      Зак. 4137

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»,  
103717, ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21.  
2-я типография издательства «Наука», 121099, Москва, Шубинский пер., 6.

УДК 624.131

ИТОГИ V МЕЖДУНАРОДНОГО КОНГРЕССА ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ. *Парабучев И. А., Бахирева Л. В.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

В статье изложены основные итоги работы V Международного конгресса по инженерной геологии, проходившего с 20 по 25 октября 1986 г. в Буэнос-Айресе (Аргентина). Рассмотрены тематика и содержание докладов на шести научных сессиях конгресса и двух симпозиумах, приуроченных к конгрессу, отмечены наиболее важные и интересные исследования, приведены результаты заседаний Совета и Генеральной ассамблеи Международной ассоциации инженер-геологов.

УДК 624.131.31

КАРТЫ-СХЕМЫ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ ОСВАИВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ КРУПНЫХ ГОРОДСКИХ АГЛЮМЕРАЦИЙ. *Груздов А. В., Трофимов Б. Т.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

Рассмотрена методика составления крупномасштабных карт физико-механических характеристик грунтов в районах со сложным геологическим строением. Приводится макет карты составленной по предложенной методике. Подобные карты позволяют инженерам-проектировщикам более рационально подходить к выбору зон и площадок строительства на стадиях генерального плана и проекта детальной планировки. Использование данных карт на стадии предпроектных проработок позволит также обоснованно назначать характер и объемы инженерно-геологических изысканий, что повысит их качество.

Рис. 1, библ. 4 назв.

УДК 624.15 : 624.139

ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ. *З. Г. Тер-Мартirosян, И. И. Демин.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

В статье излагается прикладная теория влагоупругости неоднородных массивов структурно-неустойчивых грунтов и разработанные на ее основе прикладные методы количественного прогноза напряженно-деформированного состояния при воздействии статических внешних нагрузок, собственного веса и нестационарного поля влажности. Главным преимуществом предложенной теории является возможность определения не только осадок поверхности основания, но и изменения его напряженно-деформированного состояния с учетом реальных закономерностей деформирования грунтовой среды при любом режиме увлажнения. Приводятся примеры определения напряженно-деформированного состояния инженерных сооружений на набухающих и просадочных грунтах.

Рис. 2, библ. 9 назв.

УДК 624.131

ПРОЯВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КРЕПКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД. *Горбацевич Ф. Ф.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

По данным испытаний, большая часть крепких кристаллических пород Кольского полуострова показывает линейную связь, отражаемую законом Хартига, между модулем упругости и нагрузкой, а также прямо пропорциональную зависимость между коэффициентом поперечных деформаций и нагрузкой. Механизм нелинейного деформирования состоит в смыкании берегов микротрецчин, ориентированных по нормали к действию сжимающей силы, и раскрытии тех трещин, которые ориентированы вдоль нее. Нелинейность деформирования кристаллических пород в поле геостатических напряжений верхней части земной коры должна приводить к росту горизонтальной составляющей относительно вертикальной.

Табл. 1, рис. 4, библ. 23 назв.

УДК 551.252, 624.131

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ИРКУТСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ. *Такранов Р. А.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

Рассматриваются аспекты геологической природы трещиноватости и закономерности ее формирования, которые являются основой и предпосылкой прогноза основных показателей трещиноватости: ориентировки и интенсивности. Установлены закономерности изменения этих показателей в зависимости от литологического типа угля и пород, степени метаморфизма и тектонической структуры района. Удобны для практического применения корреляционные связи интенсивности трещиноватости с такими геологическими факторами, которые систематически определяются при разведке.

В результате уточнения генезиса трещиноватости выявлена возможность прогноза ориентировки, количества и взаимоотношения систем трещин по рисунку изопахит, отображающему в общем виде структурно-тектонические условия формирования пород определенной толщи. Относительно изопахит получено пространственное соотношение и количественное распределение систем трещин разного типа. Эта закономерность распространяется на юрские и на наблюдаемые современные складки, развитые унаследованно.

Установленные закономерности изменения трещиноватости на участках складчато-разрывных дислокаций позволяют вести прогнозирование по показателям степени соответствующих деформаций.

Описаны случаи ритмического изменения густоты трещин в пределах протяженных участков и возможности ее прогнозирования.

Табл. 7, рис. 6, библ. 8 назв.

УДК 624.131

ОПЫТ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕЙ ПО КРИТИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ В МАЙКОПСКИХ ГЛИНАХ АБХАЗИИ. *Маркарьян В. В.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

Разработанный ранее метод прогноза времени образования оползней и обрушения откосов, основанный на характеристиках критических скоростей деформаций, усовершенствован применительно к долгосрочным прогнозам. Прогноз осуществляется расчетом времени накопления суммарной критической деформации. Относительная критическая деформация является константой для данного типа грунта и не зависит от скорости деформирования и величины действующих сдвигающих сил. Помимо критической деформации в расчетную формулу входят параметры, измеряемые на объекте прогноза; длина зоны сдвига, скорость оползневых перемещений, скорость подрезки основания склона и суммарная деформация, имевшая место до момента, от которого дается прогноз. Проверка расчетной формулы для 15 случаев образования оползней показала удовлетворительное совпадение прогнозных и наблюдавшихся данных. Вместе с тем объем фактического материала, использованного для оценки оправдываемости прогнозов, пока невелик, поэтому предложенный метод нуждается в дальнейшей проверке на разнообразных оползневых склонах.

Рис. 3, табл. 1, библ. 7 назв.

УДК 624.131

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ РЕЛЬЕФА. *Моностырная Т. А., Гутковский В. Н.* «Инженерная геология», 1987, № 4.

Работа посвящена изучению связи оползневых процессов с энергетическим балансом рельефа на северо-западном побережье Черного моря и прилегающей территории.

Установлено, что прямое влияние современных тектонических движений на изменение энергетического баланса рельефа относительно мало — 0,001% от суммарной энергии экзогенных геологических процессов (ЭГП).

Произведено типологическое районирование по величине суммы энергий ЭГП с учетом структурно-геодинамических типов оползней с последующим анализом энергетического баланса оползнеопасной территории.

Более детально энергетический баланс прибрежных склонов изучен на примере Сычавского опорного участка. Выявлено, что по знаку и величине суммы энергий ЭГП можно судить о направлении и скорости изменения рельефа и о степени его оползнеопасности.

Рис. 1, табл. 1, библ. 4 назв.

УДК 624.131

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ СКЛАДИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ.  
Грибанова Л. П., Бабак В. В., Зайцев А. С., Устинова З. Г., Ломов В. Ф. «Инженерная геология», 1987, № 4.

Выявлен сложный характер гео- и гидрохимического влияния крупного полигона размещения промышленных и бытовых отходов на компоненты ландшафтной обстановки и геологической среды. Установлено, что размеры ореола загрязнения вокруг крупной свалки, функционирующей 20 лет, по многим компонентам в 2—3 раза превышают рекомендуемую СНиП ширину зоны санитарной охраны. Обследование состояния ряда крупных свалок показало, что существующие нормативные требования по выбору участков свалок, их оборудованию и назначению зон санитарной охраны нуждаются в существенном пересмотре.

Рис. 2, библ. 10 назв.

УДК 624.131

ЭТАПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ И ГРУНТОВ ЗОНЫ АЭРАЦИИ В РАЙОНАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ.  
Лапицкий С. А., Алексеенко Г. П., Осипов Ю. Б. «Инженерная геология», 1987, № 4.

В работе изложена последовательность работ по исследованию загрязнения почв и грунтов зоны аэрации в районах деятельности горнодобывающих предприятий. Выделены четыре этапа, отличающиеся степенью детальности исследований. В зависимости от стадии освоения месторождения проводится тот или иной этап работ. Каждый из четырех этапов или все этапы, последовательно выполненные один за другим, могут быть осуществлены в любой период разработки месторождения и после его ликвидации. Проведение работ согласно предлагаемой схеме позволяет оценить интенсивность и масштаб загрязнения.

Табл. 1, библ. 5 назв.

УДК 624.131

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЗИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТАХ ГЕОТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ. Иваненко В. И., Мельников Б. Н., Осипов В. И., Нестеров А. И. «Инженерная геология», 1987, № 4.

В статье рассматривается метод расчета несущей способности геотехногенного массива, создаваемого в лёссовой просадочной толще. Метод основан на рассмотрении геотехногенного массива как трехслойной конструкции, состоящей из верхнего слоя — горизонтального несущего элемента, работающего как фундаментная плита большой площади, среднего слоя, являющегося грунтовой плитой, улучшенной методами технической мелиорации, и нижнего несжимаемого слоя, сложенного природным непросадочным грунтом. Наиболее важный момент всего расчета — оценка жесткостных характеристик среднего слоя с каркасно-ячеистой структурой. Для этого использовался принцип «эффективных жесткостей», широко применяемый в теории композитов. Расчет, проведенный для среднего слоя геотехногенного массива, созданного на экспериментальной площадке в заводской зоне г. Волгодонска, дал хорошую сходимость модуля общей деформации с его значением, полученным опытным путем.

Библ. 10 назв.

УДК 624.131→551.34

О ДОСТОВЕРНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОЦЕНОК СЖИМАЕМОСТИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПРИ ОТТАИВАНИИ. Хрусталев Л. Н., Водолазкин В. М. «Инженерная геология», 1987, № 4.

На примере многолетнемерзлых грунтов Воркутинского района проанализированы и сопоставлены между собой данные компрессионных и штамповых испытаний. Получено, что при сжимаемости грунтов более 2 см/м результаты компрессионных испытаний и наблюдений за деформациями сооружений и осадками земной поверхности удовлетворительно согласуются между собой. С использованием приемов математической статистики установлено соответствие выборок данных, полученных обоими способами изучения сжимаемости грунтов.

Табл. 3, библ. 6 назв.

УДК 624.131.1

КОМБИНИРОВАННЫЙ ЛОГИКО-ФОРМАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА. Богданов М. И. «Инженерная геология», 1987, № 4.

Предлагается логико-формальная комбинированная методика инженерно-геологического районирования для целей мелиоративного строительства. При выделении таксонов используются логические и логико-формальные операции. По разработанной методике проведено районирование Центральной Кахетии для целей мелиоративного строительства.

Рис. 2, табл. 3, библ. 5 назв.

УДК 624.620.192.47

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПЕСЧАНИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ. Толкачев М. Д., Поликарпов А. И., Румянцева Н. А., Ковбаса С. И. «Инженерная геология», 1987, № 4.

В статье рассматривается проблема корректного использования методов растровой электронной микроскопии при исследовании структуры порового пространства образцов горных пород. На примере песчаников, предназначенных для закачки в них промстоков калийных предприятий путем использования метода сопряженных поверхностей, решается задача количественной оценки пористости, обеспечивающей фильтрующую способность песчаников. Установлено, что ее величина в 2—2,5 раза меньше величины открытой пористости песчаников. Для снижения процесса кольматирования призабойных зон поглощающих скважин очистку закачиваемых промстоков от взвешенных частиц необходимо проводить исходя из величин и размеров фильтрующих пор песчаников.

Табл. 4, рис. 4, библ. 15 назв.