

ISSN 0203-0292

АКАДЕМИЯ НАУК СССР



# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

---

2  
1987



ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1979 ГОДУ

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

2 • 1987

март — апрель

МОСКВА

## СОДЕРЖАНИЕ

Стрижельчик Г. Г. Проблемы инженерной геологии городов и возможные пути их решения . . . . .	3
Зеофер Ю. О., Батурина И. В., Лушникова Н. П. Ретроспективный анализ состояния геологической среды . . . . .	13
Осипов В. И., Нгуен Нгок Бик, Румянцева Н. А. Циклическая набухаемость глин . . . . .	23
Брилинг И. А., Злочевская Р. И., Волков Ф. Е., Дивисилова В. И., Макеева Т. Г. Оценка распространения щелочных растворов в глинистых породах . . . . .	37
Зелинский И. П., Шатохина Л. Н. Изучение устойчивости склонов северо-западного побережья Черного моря . . . . .	46
Плотников И. И. Условия возникновения прорывов воды через зону сдвижения при разработке бокситовых месторождений Урала . . . . .	51
Осипов Ю. Б., Бучкин М. Н., Аронзон М. З. Топологическое прогнозирование инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых Урала . . . . .	56
Пендин В. В., Хацкевич А. Н. Опыт количественной оценки инженерно-геологических условий разработки месторождения на основе геолого-экономического анализа . . . . .	64
Запорожченко Э. В., Дербинян Г. А. Особенности инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий при мелиорации земель на Северном Кавказе . . . . .	75
Вознесенский Е. А., Калачев В. Я., Трофимов В. Т. Исследование тиксотропных изменений в глинистых грунтах с помощью метода неразрушающего контроля . . . . .	80
Печеркин А. И. К расчету напряжений, возникающих при формировании структур полной складчатости . . . . .	95
Плотников Н. И. Влияние техногенеза на эволюционное преобразование литосферы при водохозяйственной деятельности . . . . .	106
Дмитриев В. В., Лега Е. А. Определение параметров контроля точности оценки показателей свойств грунтов . . . . .	112
От учебных задач — к практике строительства . . . . .	119
Георгий Исаевич Тер-Степанян (к 80-летию со дня рождения) . . . . .	121

## C O N T E N T S

<b>Strizhelchik G. G.</b> Problems in urban engineering geology and feasible ways for their solution . . . . .	3-
<b>Zeegofer Yu. O., Baturinskaya I. V., Lushnikova N. P.</b> The retrospective analysis of the geological environmental state . . . . .	13-
<b>Osipov V. I., Nguen Ngok Bik, Rumyantseva N. A.</b> The cyclic swelling of clays . . . . .	23
<b>Briling I. A., Zlochevskaya R. I., Volkov F. E., Divisilova V. I., Makeeva T. G.</b> The estimate of the alkali solution occurrence in clay soils . . . . .	37
<b>Zelinsky I. P., Shatokhina L. N.</b> The study of the Black-sea north-west coast stability . . . . .	46
<b>Plotnikov I. I.</b> The causes of the water outburst through the shift zone during the bauxite deposits mining in the Urals . . . . .	51
<b>Osipov Yu. B., Buchkin M. N., Aronzon M. Z.</b> The typological prediction of the engineering geological conditions for minerals' mining in the Urals . . . . .	56
<b>Pendin V. V., Khatskevich A. N.</b> Experience in the quantitative estimate of the engineering geological conditions of mining based on the geological economic analysis . . . . .	64
<b>Zaporozhchenko E. V., Derbinyan G. A.</b> Specifics of the engineering geological and hydrogeological survey for land reclamation in Northern Caucasus . . . . .	75-
<b>Voznesensky E. A., Kalachev V. Ya., Trofimov V. T.</b> A study of the thixotropic changes in clay soils with the help of the non-destructive control method . . . . .	80
<b>Pecherkin A. I.</b> On the calculation of strain occurring at the development of the complete-folding structures . . . . .	95-
<b>Plotnikov N. I.</b> The technogeneous impact of the water supply system on the geological environment . . . . .	106-
<b>Dmitriev V. V., Lega E. A.</b> Estimate of the parameters for precise determination of soil characteristics . . . . .	112
From the theory — to the construction practice . . . . .	119
<b>Georgiy Isaevich Ter-Stepanyan</b> (to the 80th anniversary of his birthday) . . . . .	12t

УДК 624.131

СТРИЖЕЛЬЧИК Г. Г.

## ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ ГОРОДОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

### Введение

Цели и задачи инженерной геологии городов полностью вписываются в определение, данное Е. М. Сергеевым [15], инженерной геологии как науке о свойствах и динамике геологической среды, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека. Интенсивное развитие градостроительного направления инженерной геологии связано с тем, что воздействия на природную среду в городах превышают допустимые значения и многие ее компоненты существенно изменяют свои качественные характеристики, поэтому вполне закономерным является факт, что при выделении наиболее важных тем Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) первой названа тема «населенные пункты».

Как показано в трудах Ф. В. Котлова [5—9 и др.], под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности в городах изменяется рельеф, геологическое строение, состояние поверхности и подземной гидросферы, состояние и свойства горных пород, характер и интенсивность геодинамических процессов. В каждом случае проявления неблагоприятных процессов эксперты находят конкретные ошибки изыскателей, проектировщиков или строителей. Но анализ многих случаев позволяет указать на более общую причину. Это недостаточность теоретической и методологической базы для рационального освоения геологической среды. На необходимость разработки теоретических основ и методики инженерно-геологических прогнозов как основы для принятия управляющих решений, указывают Е. М. Сергеев [12], Ф. В. Котлов [9], И. С. Комаров [4], М. В. Рац [15] и др.

Анализируя системный подход при инженерно-геологических прогнозах, Г. К. Бондарик [1] дает основные представления о путях и трудностях теоретического, методического и организационного порядка в обеспечении оптимального управления функционированием геологической среды. При этом особо важной проблемой, которую предстоит решить, Г. К. Бондарик называет проблему чувствительности геологической системы к внешним взаимодействиям.

В своем изложении теоретических основ инженерной геологии Е. М. Сергеев, В. Т. Трофимов, В. К. Епишин [15] дают представление о повышении роли человека в природе с ростом производительных сил, сложности природно-технических систем, необходимости и принципиальной возможности управления развитием геологической среды. В этих рамках в настоящей работе делается попытка выделения и рассмотрения наиболее общих теоретических и методологических проблем инженерной геологии городов. Естественно, что рассмотренные проблемы и пути их решения во многом характерны и для других направлений инженерной геологии.

Эмпирическим базисом для этой работы явился многолетний опыт изысканий, выполненных УкрвостокГИИТИЗом для строительства на

территориях свыше 150 городов Левобережной Украины, длительные наблюдения за изменением геологической среды в городах и сотрудничество со специалистами многих проектных и строительных организаций.

## Современное состояние и проблемы инженерной геологии городов

С позиций инженерной геологии, главной проблемой в системе человек — геологическая среда города является проблема устойчивости геологической среды к внешним воздействиям.

Под устойчивостью, вслед за У. Р. Эшби [16] и В. Ф. Крапивиным [10], понимается способность среды «подавлять» внешние импульсы и длительное время сохранять свои функции. Иными словами, динамическая система находится в устойчивом состоянии, если определяющие ее фазовые координаты находятся в допустимых пределах (гомеостазис системы).

Природно-антропогенные<sup>1</sup> динамические системы в городах отличаются от природных более частым появлением качественно новых состояний. Неблагоприятный характер происходящих при этом изменений порождает проблемы разработки достоверных и точных прогнозов, проблемы защиты территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов.

Несмотря на то, что условия и причины возникновения неблагоприятных и опасных процессов в общем известны и имеется большой опыт борьбы с ними, для территорий сотен городов актуальными остаются проблемы борьбы с подтоплением, сдвижением пород над горными выработками, суффозионными провалами, дегидратационно-гравитационными оседаниями поверхности, оползанием склонов, просадками или набуханием и усадкой грунтов, оснований и др. Нельзя также не отметить, что актуальность этих проблем продолжает расти соответственно росту объемов строительства.

Анализ действующих нормативных документов и практики изысканий, проектирования и строительства позволяет сделать вывод, что сложившаяся ситуация обусловлена неопределенностью по основным связям (взаимодействия, преобразования, управления) в системе человек — геологическая среда города [13], причем неопределенность имеет разные основания и распространяется на весь причинно-следственный механизм системы. Можно выделить с некоторой условностью следующие виды неопределенности: природная, стратегическая, методическая, концептуальная, временная и параметрическая. Конечно, выделяемые нами виды неопределенности во многом взаимообусловлены и не принадлежат к одному порядку, но такой подход позволяет сгруппировать проблемы и выбрать пути их решения.

Природная неопределенность состоит в недостаточном знании или недостаточном учете внутренних свойств геологической среды, т. е. условий равновесия и законов развития. Наличие этой неопределенности в конкретных случаях обусловлено рядом объективных и субъективных причин. К объективным относится сложность и уникальность геологических объектов и невозможность построения моделей, охватывающих все направления и уровни развития процесса, т. е. физическая неразрешимость. На практике это приводит к генерализациям, неполно отражающим физическую сущность объекта исследований. Реальным препятствием в снижении природной неопределенности, усугубляющим влияние объективных причин, по-видимому, является узко pragматическое толкование целей инженерно-геологических изысканий. Если считать главной целью изысканий разработку прогноза изменений, как это принято

<sup>1</sup> Предполагается, что при рассмотрении системы человек — геологическая среда более подходящим является определение, введенное Ф. В. Котловым, а термин «природно-техническая» больше подходит для системы сооружение — геологическая среда.

в настоящее время, появляется много возможностей формального достижения требуемого результата без глубокого изучения внутренних свойств среды на данном участке. Для этого применяются вероятностные методы, аналогии и экспертные оценки. К другим субъективным причинам можно отнести недостаточную техническую вооруженность изысканий, несовершенное нормирование и планирование изыскательских работ, что безусловно наносит ущерб системности и снижает глубину изучения природных факторов.

Объективные и субъективные причины приводят к ошибочным оценкам и прогнозам свойств грунтов и геодинамических процессов. В результате проектные решения приобретают недостаточную или излишнюю надежность. Попытки же прикрытия слабого эмпирического базиса сложной математической надстройкой в процессе обработки полевых и лабораторных данных в ряде случаев не способствуют снижению природной неопределенности, но создают опасную иллюзию обоснованности прогнозов, выводов и рекомендаций. Не достигается снижение природной неопределенности и в тех случаях, когда недостаточно глубокие исследования завершаются субъективной оценкой инженерно-геологических условий по степени благоприятности для строительства (через баллы, категории или степень риска).

**Стратегическая** неопределенность связана с существованием отмеченных Ф. В. Котловым двух альтернативных подходов к освоению территории — учесть возможность возникновения неблагоприятных процессов или ее предотвратить. Первый подход (учесть) состоит в том, что проектировщик, основываясь на однозначно детерминированном инженерно-геологическом прогнозе, принимает решение о защите зданий и сооружений. Второй подход (предотвратить) состоит в принятии решений о регулировании воздействий на геологическую среду, обеспечивающих сохранение ее качественных характеристик. Такая неестественная расстановка (на первом месте — учет и защита, на втором — регулирование воздействий) как раз и отражает ситуацию, сложившуюся в градостроительстве, где развиты тенденции борьбы со следствием, а не с причинами. В последние годы наиболее ярко это прослеживается в прогнозировании подтопления и борьбе с этим неблагоприятным явлением. Достаточно обратить внимание на тот факт, что изыскатели, в соответствии с действующими нормативными документами, определяют величину возможного подъема уровня грунтовых вод на основании однозначно заданных проектировщиком параметров дополнительного инфильтрационного питания. Понятно, что в таком прогнозе содержится ответ только на вопрос, как может измениться состояние геологической среды при конкретном воздействии, а вопрос о том, какие воздействия допустимы для определенного (природного или заданного) состояния среды, остается без прямого ответа. Неизбежным следствием является приоритет решений о защите зданий и сооружений от запланированного подтопления. Из приведенного примера видно, что инженерно-геологические изыскания и проектирование еще не ориентированы на рациональное использование и охрану геологической среды в городах. Неопределенность в этом вопросе приводит к тому, что управление развитием геологической среды чаще всего осуществляется посредством реакции на события, которые «неизбежно» произойдут или уже произошли.

**Методическая** неопределенность, с позиций управления развитием геологической среды, наиболее ярко проявляется в прогнозировании. Несмотря на резкий рост внимания специалистов к инженерно-геологическому прогнозированию (что связано с повышением интенсивности воздействий на геологическую среду, освоением участков со сложными условиями и соответствующим ростом требований к качеству изысканий), можно отметить, что у изыскателей пока отсутствуют четкие представления о видах и методах прогнозирования в зависимости от целей,

конкретных задач и периодов упреждения. Иначе говоря, отсутствует общепринятая типология инженерно-геологических прогнозов. Отсутствуют также общепринятые требования к достоверности и точности прогнозов, что приводит к многочисленным конфликтам как при разработке прогнозов, так и при сопоставлении их с реализацией.

Практика изысканий для городского строительства подтверждает вывод В. М. Гороховского и М. В. Раца [3] о том, что существующее состояние прогнозирования изменений геологической среды не соответствует тому риску, который связан с возможностью нежелательных экологических последствий. Судя по многочисленным публикациям, теоретические и методические разработки в области инженерно-геологического прогнозирования пока не вышли из стадии анализа возможности применения известных в науке методов и поиска путей повышения качества исходной информации. Это приводит к отмеченному В. М. Гороховским [2] преувеличению возможности замкнутых оценок достоверности прогнозов. В то же время еще недостаточно уделяется внимания вопросам о видах и назначении прогнозов в управляемой системе.

**Концептуальная** неопределенность связана с недостаточным представлением изыскателей о возможных видах воздействий на геологическую среду при освоении территории, что приводит к неверному или неполному описанию возможных состояний этой среды в будущем. При анализе технологии проектно-изыскательских и строительных работ довольно четко прослеживаются источники концептуальной неопределенности. Выдача технического задания на изыскания не устраняет неопределенности в части предполагаемых воздействий, так как после получения результатов изысканий принимаются новые проектные решения, которые могут не совладать с исходными предпосылками, принятыми при разработке прогнозов в период изысканий. Несмотря на это, прогнозы обычно не пересматриваются и не уточняются, а фактическое состояние геологической среды в дальнейшем оказывается отличным от прогнозируемого по целому ряду признаков.

На устранение этого источника неопределенности направлены предложения М. В. Раца [15] по созданию единой технологии проектно-изыскательских работ. Но, к сожалению, имеются еще другие важные источники. Это сложившаяся практика строительства и эксплуатации зданий и сооружений в городах, которая изобилует многочисленными отклонениями от нормативной технологии.

По указанным выше причинам возникают следующие ситуации, обычно не предусматриваемые в прогнозах: образование нового водоносного горизонта в насыпных грунтах; обводнение и снижение устойчивости грунтов в откосах при устройстве подпорных стенок без дренажей и выпусков грунтовых вод; затопление подвалов через пазухи вдоль стен здания; подтопление или развитие суффозионных процессов при длительных утечках из водонесущих коммуникаций; набухание или просадки грунтов при длительном воздействии щелочных или кислотных растворов; снижение прочностных и деформационных свойств грунтов при затоплении котлованов поверхностными водами и промораживании и др. Приведенные примеры доказывают необходимость разработки единой (в части управления развитием геологической среды) технологии в ряду изыскания — проектирование — строительство — эксплуатация.

**Временная** неопределенность связана с отсутствием достоверных сведений о возможных изменениях характера воздействий на геологическую среду при большом периоде упреждения прогноза. Обычно при выполнении изысканий для конкретного строительства не учитываются отдаленные перспективы освоения подземного пространства, регулирования речного стока, дренирования или обводнения прилегающих территорий, строительства новых или отключении действующих водозаборов и другие важные факторы. Нередки случаи, когда взятие реки в коллектор

(облицовка набережных или засыпка балок) приводило к подтоплению прилегающих территорий; снижение интенсивности эксплуатации подземных водозаборов — к восстановлению уровней и затоплению подземных частей зданий и сооружений, или повышение интенсивности — к развитию суффозионных процессов и провалам грунтов под существующей застройкой.

**Параметрическая** неопределенность состоит в недостаточной надежности исходных данных о параметрах воздействий на геологическую среду и в отсутствии данных об изменении этих параметров во времени (например, дополнительного инфильтрационного питания из водонесущих сетей через 15 или 25 лет их эксплуатации).

Наличие временной и параметрической неопределенностей существенно влияет на достоверность и точность долгосрочных прогнозов. Данные наблюдений на территориях крупных городов (Харьков, Донецк, Ворошиловград, Днепропетровск, Запорожье и др.) свидетельствуют, что фактические и прогнозируемые значения характеристик состояния геологической среды (особенно подземной гидросфера) могут отличаться в несколько раз. Эти данные в очередной раз подтверждают, что система человек — геологическая среда не может рассматриваться как абсолютная, так как наличие определенного состояния системы в какой-либо фиксированный отрезок времени не обуславливает однозначно последующую линию ее поведения. В существующих же требованиях по разработке однозначно детерминированных и дискретных по времени прогнозов уже заранее заложена возможность создания конфликтных и даже аварийных ситуаций. По этим причинам имеет место и другая крайность, состоящая в экстраполяции наихудшей из возможных тенденций, приводящая к удорожанию строительства.

### Пути решения

Из приведенного выше краткого обзора можно сделать общий вывод, что пути решения основных проблем инженерной геологии городов проходят через устранение или снижение неопределенности в управляемой системе. Борьба с неопределенностью выступает, таким образом, в качестве общей теоретической предпосылки для разработки методологии управления развитием геологической среды.

Главное внимание геологов в настоящее время сосредоточено на устраниении природной неопределенности, и это, естественно, сохранится и в дальнейшем. Наибольший эффект в этом направлении достигается в работах, построенных на учете региональных закономерностей геологической среды: в геологическом строении, состоянии и свойствах пород, характере и интенсивности геодинамических процессов. Но, к сожалению, еще многие попытки оптимизации видов и объемов инженерно-геологических исследований при определении зоны взаимодействия зданий и сооружений с геологической средой замыкаются на геотехническом аспекте. Такая оптимизация безусловно нужна, но строиться она должна на переходе от изучения общих закономерностей природного района к изучению особенностей конкретного участка.

По-видимому, нет смысла более подробно излагать известные пути и методы повышения полноты и достоверности информации, получаемой при изысканиях. Расширение и углубление знаний о природной среде является объективным и бесконечным процессом.

В качестве же нового направления в снижении природной неопределенности предлагается рассматривать изучение и оценку ресурсов устойчивости геологической среды к внешним воздействиям. Очевидно, что такая оценка и должна являться одной из главных целей инженерно-геологических исследований. Что же касается прогнозирования, то это неотъемлемое свойство всякой сознательной деятельности характерно

для инженерной геологии в той же степени, как и для других прикладных наук. Оценки ресурсов устойчивости в отличие от оценок природного геодинамического потенциала (необходимых при региональной оценке устойчивости внегородских территорий) должны строиться на учете конкретных физических параметров системы человек — геологическая среда. В настоящее время прослеживается необходимость оценки ресурсов устойчивости городских территорий к такому воздействию, как дополнительное инфильтрационное питание. В зависимости от природных особенностей осваиваемых участков возникает необходимость оценки ресурсов устойчивости склонов, супфазионной устойчивости грунтов и др. В качестве примера такой оценки в механике грунтов может служить определение влажности просадки и начального просадочного давления.

В общем виде методика оценки ресурсов устойчивости основывается на определении максимально допустимых значений импульсов воздействия (поступления воды, приложения статических или динамических нагрузок, температурных воздействий и др.). Конечно, предшествовать этому должно выявление гомеостазиса, т. е. границ допустимых изменений геологической среды.

В конкретных случаях ресурс устойчивости к подтоплению можно получить как разность между критической (соответствующей нарушению гомеостазиса) и природной величиной инфильтрационного питания, к оползневому смещению — как разность между интегральными показателями сил сопротивления и сдвигающих сил и т. д. Последовательно, через оценки ресурсов устойчивости к разным воздействиям, может быть дана комплексная оценка условий сохранения гомеостатического состояния геологической среды или (при отрицательных значениях ресурса) степень нарушения гомеостазиса. С внедрением предложенного более четко обозначается границы ответственности геологов за результаты своих исследований, а это приведет к более углубленному изучению свойств геологической среды.

Таким образом, оценка ресурсов устойчивости к внешним воздействиям синтезирует в себе цели и задачи инженерной геологии как науки о свойствах и динамике геологической среды, ее рациональном использовании и охране в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека.

Необходимым условием оптимального управления является устранение стратегической неопределенности. Эта проблема решается на основе учета ресурсов устойчивости путем последовательной оптимизации принимаемых решений.

В общем случае стратегия освоения участка городской территории вырабатывается следующим образом: в техническом задании на изыскания указываются виды воздействий на геологическую среду и предельно допустимые характеристики по основным природным факторам; в процессе изысканий изучаются причинно-следственные связи, составляется алгоритм (модель) взаимодействия, оценивается ресурс устойчивости геологической среды (в виде предельно допустимых значений воздействий для заданного состояния среды), определяется возможность развития сопутствующих изменений и разрабатываются рекомендации по способам регулирования воздействий или повышения ресурсов устойчивости; в процессе проектирования осуществляется последовательная технико-экономическая оценка необходимости и возможности регулирования воздействий или повышения ресурсов устойчивости и окончательный выбор стратегии (предотвратить или учесть возможность развития неблагоприятных процессов).

Из этой общей схемы видно, что оценка и учет ресурсов устойчивости имеют определяющее значение в выборе стратегии. В связи с этим возникает предложение о необходимости более четкого методологического разграничения деятельности, направленной на повышение ресурсов:

устойчивости геологической среды к внешним воздействиям и на собственно защиту зданий и сооружений от неблагоприятных процессов. Вполне очевидно, что прорезка водоупора при устройстве дренажа, силикатизация грунтов со слабыми структурными связями, уплотнение просадочных грунтов, вы полаживание склонов и другие подобные мероприятия относятся не к защите, а к предотвращению возможности возникновения неблагоприятных процессов через повышение ресурса устойчивости. Также очевидно, что для выбора наиболее оптимальной стратегии проектировщик должен располагать соответствующими исходными данными. Напрашивается вывод, что эти данные должны содержаться в материалах изысканий, как это принято, например, в отношении характеристики свойств грунтов после уплотнения. Потребность в специальных исследованиях и разработке мероприятий явила ся бы мощным стимулом повышения эффективности изысканий и развития прикладных направлений инженерной геологии и ряда смежных наук.

С указанных выше стратегических позиций, в которых прослеживаются основы самоорганизации системы человек — геологическая среда, предлагается рассмотреть вопросы о видах и назначении инженерно-геологических прогнозов.

В первую очередь привлекает внимание факт, что в прогностике [11] выделяются два основных вида прогнозов: поисковый и нормативный. В поисковом прогнозе, определяющем возможные состояния объекта прогнозирования в будущем, обязательным условием является сохранение существующих тенденций. В нормативном прогнозе, определяющем пути достижения возможных состояний объекта прогнозирования в будущем, принимаемых в качестве цели, обязательным условием является наличие заранее заданных норм.

Прогнозы на основе сохранения существующих тенденций (экстраполяции) имеют широкое применение в практике изысканий. Качественные и количественные результаты этих прогнозов ложатся в основу формирования целей по освоению геологической среды, т. е. сохранять или целенаправленно изменять тенденции ее развития. Из этого можно сделать вывод, что целью поискового прогноза является подготовка оснований для управления.

Более подробно следует остановиться на вопросе о нормативном прогнозе, так как в инженерно-геологической литературе этот вид прогнозов не рассматривался. Логическая последовательность и содержание операций по разработке нормативного прогноза соответствует описанной выше процедуре выбора стратегии и состоит в определении допустимого состояния среды (генеральной цели) и ресурсов устойчивости, последовательном переборе и оценке эффективности возможных решений по регулированию воздействий или повышению ресурсов устойчивости (оптимизации путей достижения цели). Важно отметить, что нормативный прогноз должен быть комплексным. Комплексность его формируется при определении генеральной цели, охватывающей инженерный и экологический аспекты допустимых состояний геологической среды.

При таком подходе проясняется, что основная часть традиционных прогнозов изменений среды при заданных воздействиях (например, подтопления территории, просадки грунтов основания, устойчивости откоса и др.) является по существу проверкой эффективности предполагаемого проектного решения. В терминах прогностики эта операция соответствует проверке эффективности только одного варианта в процедуре оптимизации нормативного прогноза. Понятно, что такой прогноз не может быть окончательным и не должен являться главной целью инженерно-геологических изысканий.

Оценка достоверности и точности прогнозов необходима как в процессе их разработки, так и при сопоставлении с реализацией. В основу оценки поисковых прогнозов может быть положено представление о до-

достоверности и точности как совокупном свойстве, характеризующемся четырьмя признаками: вероятностью, полнотой, временем и параметрами. На этой основе требования к достоверности и точности поисковых прогнозов в процессе их разработки могут быть сформулированы следующим образом: достоверным и точным будет прогноз инженерно-геологических процессов и явлений, вероятность развития которых подтверждается сочетанием соответствующих признаков и известными представлениями о причинно-следственных связях в системе, а количественные характеристики (по времени и параметрам реализации) обоснованы оптимальным объемом и качеством исходной информации.

Оценка нормативных прогнозов может даваться на основе их эффективности, т. е. по степени учета всех резонансных воздействий на среду, отношению интенсивности планируемых воздействий к ресурсу устойчивости, соответствуя планируемым состояниям среды, решению инженерных и экологических задач.

Иной подход должен быть к оценке достоверности и точности при сопоставлении прогнозов с их фактической реализацией. Сразу следует отметить, что для городских территорий оценка поисковых прогнозов, строящихся на экстраполяции тенденций и имеющих самостоятельное значение только при региональных исследованиях, менее актуальна. Выполняться она может на основе принципов, предложенных нами ранее [14]. Нормативный же прогноз можно считать достоверным и точным, если фактическое состояние геологической среды по значащим переменным соответствует гомеостазису и обоснованным запасам надежности.

Как уже отмечалось, необходимая достоверность и точность не может быть обеспечена только за счет разработки прогноза на стадии изысканий. Для этого потребовалось бы кроме абсолютной адекватности модели природному аналогу (что в принципе невозможно) абсолютное совпадение окончательных проектных решений, технологии строительства и эксплуатации с нормативным прогнозом. Последнее, как показывает опыт, мало вероятно. Поэтому единственный путь снижения концептуальной неопределенности заключается в контроле за степенью соответствия принятых проектных решений, выполняемых строительных работ и эксплуатации нормативному прогнозу. Методика такого контроля должна быть изложена в соответствующих главах строительных норм и правил. Процедура контроля на каждом из этапов (проектирование, строительство, эксплуатация) та же, что и при проверке вариантов нормативного прогноза, т. е. прогноз состояния геологической среды в будущем на основе однозначно заданных параметров воздействий. В случае, если обнаруживается возможность выхода системы из гомеостазиса, принимаются соответствующие решения о соблюдении условий или корректировке нормативного прогноза.

Заметим, что при наличии в материалах изысканий алгоритма прогноза и информации о свойствах природной среды, контроль и корректировка нормативных прогнозов может осуществляться как с участием, так и без участия геологов. В зависимости от сложности инженерно-геологических условий это может оговариваться в отчете об изысканиях.

Деятельность по прогнозированию и управлению развитием геологической среды в городах не завершается устранением концептуальной неопределенности.

Из-за наличия временной и параметрической неопределенности нельзя рассчитывать, что дискретное прогнозирование с большим периодом упреждения обеспечит получение достоверных и точных данных о состоянии геологической среды в будущем. Но, с другой стороны, нельзя отказаться от долгосрочных прогнозов, так как только на их основе может быть обеспечено устойчивое управление. Выход из этого положения возможен через сочетание принципов непрерывности и дискретности. В основу сочетания можно положить известные из практики сведения о

длительности эволюционных циклов в развитии системы человек — геологическая среда и «скаках». Действенность прогнозов ограничивается эволюционным циклом развития, и, по мере изменения характера или интенсивности воздействий, должны корректироваться прогнозы и приниматься решения по «вторичному управлению», как это предлагается В. К. Епишиным [15].

Для территории города в целом эволюционный цикл может быть принят по срокам реализации генерального плана (20—25 лет). Для отдельных инженерно-геологических районов — по срокам освоения (реконструкции) значительных площадей или строительства крупных объектов (5—7 лет), а для участков — по срокам строительства отдельных зданий и сооружений (1—3 года). Предлагаемые шаги дискретизации определяют сроки действенности и корректуры долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных прогнозов и сроки принятия управляющих решений разного масштаба.

### Заключение

В настоящее время необходимость перехода от учета возможности возникновения неблагоприятных геологических процессов в городах к активному управлению развитием геологической среды очевидна. Также очевидно, что традиционное понимание целей и задач инженерно-геологических изысканий для городского строительства не соответствует этому. Для успешной реализации предлагаемого перехода требуется новая методология инженерно-геологических изысканий, содержащая в себе целенаправленные действия по снижению неопределенности по основным составляющим системы человек — геологическая среда, при системной подчиненности процедур изучения, оценок и прогнозов целям управления развитием геологической среды. Основными элементами новой методологии являются: определение допустимых состояний геологической среды в инженерном и экологическом аспектах; оценка ресурсов устойчивости геологической среды к внешним воздействиям; разграничение понятий о повышении ресурса устойчивости геологической среды и собственно защите зданий и сооружений от неблагоприятных процессов; разработка поисковых и нормативных прогнозов с обязательной комплексной оценкой их достоверности, точности и эффективности (оптимальности); соблюдение принципов сочетания дискретности и непрерывности прогнозирования, обеспечивающих учет эволюционных этапов и скачков в развитии геологической среды; обеспечение контроля на всех этапах реализации нормативных прогнозов.

В общем виде предлагаемый контур управления развитием геологической среды состоит из следующего: изучение и оценка — поисковый прогноз — определение гомеостазиса — оценка ресурсов устойчивости — нормативный прогноз — реализация нормативного прогноза (в проекте, строительстве, эксплуатации) — контроль реализации — оперативное решение (вторичное управление).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г. К. Системный подход при инженерно-геологических прогнозах. Матер. 27-го Междунар. геол. конгресса. Т. 17. М., 1984. С. 52—58.
2. Горюховский В. М. Математические методы и достоверность гидрогеологических и инженерно-геологических прогнозов. М.: Недра, 1977. 76 с.
3. Горюховский В. М., Рац М. В. К методологии инженерно-геологического прогнозирования.— В сб.: Математ. методы в инж.-геол. исслед. М.: Стройиздат, 1983. с. 3—14.
4. Комаров И. С. Основы управления геологической средой в городах.— В сб.: Пробл. инж. геол. городов. М.: Наука, 1983, с. 201—202.
5. Котлов Ф. В., Брашинина И. А., Сипягина И. К. Город и геологические процессы. М.: Наука, 1967. 226 с.

6. Котлов Ф. В. Проблемы инженерной геологии в связи с градостроительством.— В сб.: Инж. геол. и градостроительство. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 10—16.
7. Котлов Ф. В. Изменение природной геологической среды на территориях городов и промышленных центров.— В сб.: Рациональное использование земной коры. М.: Недра, 1974. С. 14—18.
8. Котлов Ф. В. Антропогенные геологические процессы на территории города. М.: Наука, 1977. 172 с.
9. Котлов Ф. В. Современные проблемы инженерной геологии городов и градопромышленных агломераций.— В сб.: Пробл. инж. геол. городов. М.: Наука, 1983. С. 5—12.
10. Крапивин В. Ф. Теория живучести сложных систем. М.: Недра, 1978, 276 с.
11. Рабочая книга по прогнозированию. М.: Мысль, 1982, 429 с.
12. Сергеев Е. М. Инженерная геология — наука о геологической среде.— Инженерная геология, 1979, № 1. С. 3—19.
13. Стрижельчик Г. Г. Проблемы прогнозирования и управления развитием природно-антропогенных систем городских территорий.— В сб.: Пробл. инж. геол. городов. М.: Наука, 1983, С. 65—68.
14. Стрижельчик Г. Г. Теоретические и организационно-методические принципы оценки достоверности инженерно-геологических прогнозов.— В сб.: Пробл. инж. геол. в связи с промышленно-гражданским строительством и разработкой месторождений полезных ископаемых. Свердловск: 1984. С. 51—55.
15. Теоретические основы инженерной геологии. Социально-экономические аспекты. М.: Недра, 1985. 259 с.
16. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 432 с.

Восточно-Украинский государственный  
институт инженерно-технических  
изысканий (УкрвостокГИИНТИЗ)

Поступила в редакцию  
9.IV.1986

УДК 624.131

ЗЕЕГОФЕР Ю. О., БАТУРИНСКАЯ И. В., ЛУШНИКОВА Н. П.

**РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Традиционный анализ информации, итогом которого обычно является составление карт инженерно-геологического районирования градостроительно освоенных территорий, далеко не всегда является достаточным для осуществления прогнозов изменений геологической среды, а также обоснования путей и средств достижения ее состояний, благоприятных с экологических и экономических позиций. Это обстоятельство особенно очевидно проявляется в процессе исследования территорий, переживших не один этап хозяйственного развития. Дело в том, что в пределах этих территорий фиксируемое на предпрогнозный период состояние геологической среды является совокупным результатом в общем случае разнородленных, различных по виду, интенсивности и длительности воздействий, осуществлявшихся в течение более или менее длительного периода времени. Вследствие этого выявляемые на предпрогнозный срок характеристики состояния геологической среды могут не быть адекватными наблюдаемым на этот срок видам техногенных воздействий и их пространственному распределению. Этим в существенной мере ограничиваются возможности установления связей между воздействиями на геологическую среду, ее изменениями и последствиями для функционирования территориальной хозяйственной системы.

Опыт имеющихся исследований территорий крупных городов убедительно показывает, что преодоление указанных затруднений возможно лишь на основе осуществления в общем комплексе исследований ретроспективного анализа состояний геологической среды. Основными целями такого анализа являются: 1) установление причинно-следственных связей между воздействиями и изменениями геологической среды; 2) оценка последствий изменений; 3) выявление главных и второстепенных факторов произошедших изменений; 4) установление прогнозируемых (в рамках поисковых и нормативных прогнозов) показателей.

В связи с этим ретроспективный анализ состояний геологической среды как системы должен осуществляться по трем основным взаимосвязанным аспектам — анализ состояний различных компонентов геологической среды; анализ природного фона и техногенных воздействий; анализ последствий произошедших изменений. Для этого необходима вполне определенная информационная база. В первых двух случаях состав используемой информации такой же, как и состав информации, использующейся для построения карт типологического инженерно-геологического районирования и инженерно-хозяйственного воздействия [1]. Различие заключается лишь в том, что в процессе ретроспективного анализа используется информация за весь период освоения и эксплуатации территории. Информационной базой для анализа последствий изменений геологической среды являются данные о деформациях и разрушениях зданий и инженерных сооружений по геологическим причинам, данные о деградации природных ресурсов, изменения санитарно-гигиенической обстановки мест расселения и т. п. Анализ этих данных в ретроспективе является одним из наиболее действенных способов установления комп-

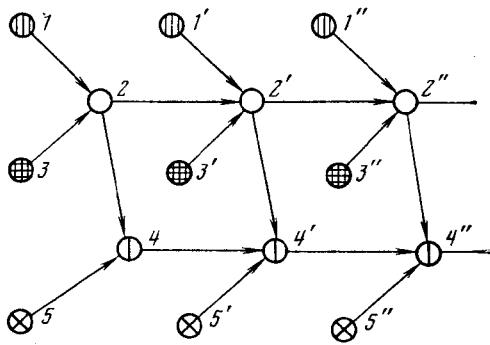


Рис. 1

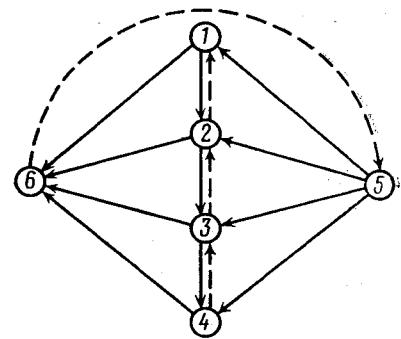


Рис. 2

Рис. 1. Схема обработки информации на базе построения картографических моделей: 1, 1', 1'' — карты состояния компонентов геологической среды; 2, 2', 2'' — карты изменений компонентов геологической среды; 3, 3', 3'' — покомпонентные карты инженерно-хозяйственного воздействия; 4, 4', 4'' — карты оценки последствий изменений; 5, 5', 5'' — карты последствий изменения геологической среды

Рис. 2. Логическая схема развития изменений геологической среды: 1 — изменение рельефа (накопление техногенных отложений); 2 — изменение гидрогеодинамической обстановки; 3 — изменение условий тепло-массопереноса; 4 — изменение горных пород; 5 — воздействия; 6 — последствия изменений для хозяйственной системы. Штриховыми линиями со стрелками показаны связи, проявляющиеся не всегда или проявляющиеся преимущественно слабо

лекса оценочных критериев, необходимых для обоснования природоохранных мероприятий по результатам нормативных прогнозов. К важнейшим из таких критериев следует отнести прямой экономический ущерб, наносимый хозяйствству изменениями геологической среды.

Учитывая в общем случае неформальный характер ретроспективного анализа, в качестве его инструмента целесообразно использовать аналоги карт типологического инженерно-геологического районирования и инженерно-хозяйственного воздействия, специально составляемые на сроки, соответствующие основным этапам хозяйственного развития территории. Надо, чтобы они порознь отражали состояния различных компонентов геологической среды и определяющие их виды воздействий. В основу этих карт может быть положена приведенная к сопоставимому виду информация разновременных топографических, гидрогеологических, инженерно-геологических и т. п. карт, а также карт и схем, использующихся в процессе градостроительного планирования и проектирования. Их анализ дает возможность, в свою очередь, составления покомпонентных карт изменений геологической среды. Последние необходимы для оценки последствий, связанных с установленными изменениями. Такая оценка осуществляется на основе сопоставления информации об изменениях среды на тот или иной срок с картографически фиксируемой информацией о последствиях изменений. Результаты этой оценки целесообразно в конечном счете отразить на специальных оценочных картах, содержащих, например, информацию о территориальном распределении экономических ущербов, являющихся следствием трансформации геологической среды. В дальнейшем карты изменений геологической среды, а также оценочные карты могут быть использованы соответственно для обоснования поисковых и нормативных прогнозов. Общая схема обработки информации на базе построения указанных карт показана на рис. 1.

Определение видов покомпонентных карт, а также последовательности их составления должны подчиняться цели исследования взаимосвязей между факторами техногенеза (воздействиями) и изменениями

геологической среды, а также взаимосвязей изменений различных ее компонентов. Указанное обстоятельство подразумевает необходимость организации ретроспективного анализа с учетом последовательности осуществления воздействий и относительной устойчивости компонентов геологической среды к изменениям. Это осуществимо в общем случае на основе предварительно составляемой логической схемы природно-техногенных взаимодействий, наблюдаемых в пределах рассматриваемой территории. Для множества территорий такая логическая схема может быть представлена, например, в виде, изображенном на рис. 2. Разумеется, что подобная схема, выполняя организационную в отношении ретроспективного анализа функцию на начальном его этапе, может и должна уточняться в процессе анализа. Обусловленный же на рис. 2 характер взаимодействий делает целесообразным, например, сначала составление карт изменения рельефа и образования техногенных отложений, затем последовательно карт изменения гидрогеодинамической обстановки, гидрогеохимических карт, карт изменения горных пород.

Причинно-следственные связи между воздействиями, изменениями геологической среды, а также последствиями изменений достаточно сложны и устанавливаются применительно к иерархии таксонов, выделяемых в процессе типологического инженерно-геологического районирования, в последовательности от более крупных таксонов к менее крупным. Этот процесс тесно связан с установлением главных факторов произошедших изменений геологической среды. Их выявление в общем случае возможно осуществить на основе классификации видов воздействий по размеру зон их влияния. Понятно, что такую классификацию можно построить, лишь ориентируясь на иерархию таксонов, выделяемых на карте инженерно-геологического районирования. При этом главными факторами изменений следует считать (это обстоятельство является важным для обоснования в дальнейшем процедуры поисковых прогнозов) те, зоны влияния которых охватывают значительные участки территории или всю рассматриваемую территорию и являются значительно большими размеров мест приложения воздействий. Второстепенными же факторами являются воздействия, зоны влияния которых могут быть ограничены пределами таксонов того или иного уровня. Для значительного числа территорий главным фактором изменений, например, может являться эксплуатация подземных вод. Из этого, кстати, следует, что главный фактор изменений не всегда связан с тем первым видом воздействий, с которого начинаются изменения геологической среды.

Выявление главных факторов, приводящих к наиболее неблагоприятным последствиям для функционирования хозяйственной системы, возможно лишь по результатам оценки последствий изменения геологической среды. При этом главными в рассматриваемом смысле естественно считать изменения, с которыми связан наибольший ущерб, нанесенный хозяйственной системе. Вообще говоря, в качестве указанных факторов могут выступать не только какие-либо изменения, но и виды воздействий или их совокупности. Все в данном случае определяется объективной возможностью дифференциации причинно-следственных связей в процессе анализа.

Касаясь задачи установления прогнозируемых показателей, следует отметить, что в рамках осуществления поисковых прогнозов ими являются показатели геологических процессов, протекание которых обуславливает наблюдаемые изменения. В рамках же осуществления нормативных прогнозов прогнозируемыми являются те же показатели, но регламентируемые необходимостью достижения состояний геологической среды, наиболее благоприятных с позиций функционирования хозяйственной системы. Установление таких показателей осуществляется на основе сопоставления информации об изменениях среды и их последствиях. Уместно заметить, что эта задача является весьма важной, по-

скольку регламентируемые показатели в дальнейшем должны стать плановыми. Без последних невозможно эффективное управление изменениями геологической среды.

Такова в целом схема осуществления ретроспективного анализа состояний геологической среды, полезность использования которой подтверждается имеющимся опытом работ на территории крупных городов.

Вместе с тем следует отметить, что исследования по этой схеме встречают обычно значительные затруднения информационного характера. Эти трудности определяются прежде всего слабым развитием на территории городов сети регулярных режимных наблюдений за изменениями геологической среды и природного фона, а также практически полным отсутствием результатов систематических исследований, направленных на перманентное получение и картографическую отработку информации, характеризующей развитие хозяйственной системы городов (в форме, необходимой для проведения ретроспективного анализа). Помимо этого следует отметить и весьма плохую организацию учета случаев деформаций и разрушения зданий и сооружений, а также других последствий изменения среды. Преодоление указанных трудностей возможно лишь на основе весьма трудоемких работ, предполагающих проведение сбора и обработки огромного количества сведений, косвенно относящихся к целям ретроспективного анализа. Этими сведениями являются данные разновременных схем освоения и функционального использования городских территорий, данные разновременных топографических съемок, наконец, данные разновременного бурения скважин в процессе инженерных изысканий, обычно сопровождаемые результатами измерения уровней подземных вод, определения их химического состава, физико-механических свойств горных пород и т. д. Основные принципы и результаты обработки косвенной информации по специально обоснованным для этого методикам изложены к настоящему времени в ряде работ [2—4].

Например, исследования изменений рельефа [4—6] территории Москвы на уровне сопоставления морфометрических характеристик речных бассейнов, а также воздействий на рельеф позволяют качественно оценить изменение в структуре подземного, склонового и руслового стока, оценить влияние изменений рельефа на влаго- и теплообмен геологической среды с атмосферой, выявить тенденции в изменении уровенного режима грунтовых вод, в том числе и за счет изменения геологического строения территории, обусловленного накоплением техногенных отложений (табл. 1). В ряде случаев ретроспективный анализ изменений рельефа и накопления техногенных отложений позволяет уточнить генезис проявлений геологических процессов, в частности суффозионно-проявальных. Значительная их часть, как известно, может иметь техногенное происхождение, развиваясь на участках засыпанных карьеров, водоемов, погребенных подвалов снесенных зданий, старых подземных выработок и т. д. Понятно, что это обстоятельство является весьма важным при обосновании прогнозных моделей соответствующих процессов.

Применение метода элементарных площадок<sup>1</sup> для обработки разновременных измерений уровней подземных вод [2] позволило получить достаточно полную картину изменений поверхности подземных вод за последние несколько десятков лет, которую нельзя было получить, опираясь только на скважины режимной сети. При этом были выявлены зоны снижения и повышения уровней грунтовых вод, зоны образования новых водоносных горизонтов, не имеющих гидравлической связи с нижележащими. Для областей с относительно стационарным положением уровней удалось получить характеристики их многолетних изменений, оказавшиеся весьма близкими к получаемым по данным наблюдатель-

<sup>1</sup> Этот метод позволяет обрабатывать результаты разновременных измерений уровней подземных вод, приходящихся на площадку определенного размера, таким же образом, как и результаты измерений уровней в скважинах.

Таблица 1

## Морфометрические характеристики бассейнов рек г. Москвы (по Э. А. Лихачевой)

№ п.п.	Река (порядок бассейна)	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	Яуза (III)	109,2	26,5	—	12,6	39,1	0,24	0,24
2	Яуза (IV)	340,8	123,9	30,3	34,3	188,5	0,36	0,45
3	Ичка (III)	35,9	19,4	—	0,7	20,1	0,54	0,54
4	Чермянка (III)	43,1	24,7	1,3	12,8	38,8	0,57	0,60
5	Лихоборка (III)	64,3	18,7	6,2	4,0	28,9	0,29	0,39
6	Серебрянка (III)	77,3	6,6	22,8	4,2	33,6	0,09	0,38
7	Сетунь (III)	89,7	53,2	0,2	37,1	90,6	0,59	0,60
8	Сетунь (IV)	179,5	66,0	4,8	59,2	130,0	0,37	0,40
9	Раменка (III)	36,9	17,5	4,6	22,1	44,2	0,47	0,59
10	Городня (III)	40,2	15,2	7,0	27,6	49,8	0,38	0,55
11	Городня (IV)	103,8	44,7	16,4	67,5	129,6	0,43	0,59
12	Чертановка (III)	42,7	16,0	2,4	25,0	43,4	0,38	0,43
13	Ходынка (II)	19,5		14,0		14,0		0,72
14	Пресня (III)	15,3		9,9		9,9		0,66
15	Неглинка (III)	14,7		17,3		17,3		1,18
16	Граворонка (II)	93,0	11,7	13,0	11,6	36,3	0,13	0,27
17	Кровянка (II)	15,7		8,6	1,5	10,1		0,55
18	Котловка (III)	18,4	10,2	3,1	4,1	17,4	0,55	0,88

№ п.п.	Река (порядок бассейна)	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
1	Яуза (III)	0,12	0,36	68	—	32	0,30
2	Яуза (IV)	0,1	0,55	65	16	19	0,40
3	Ичка (III)	0,02	0,56	97	—	3	0,30
4	Чермянка (III)	0,3	0,90	64	3	33	0,37
5	Лихоборка (III)	0,06	0,47	65	21	14	0,50
6	Серебрянка (III)	0,06	0,44	20	68	12	0,40
7	Сетунь (III)	0,41	1,01	59	0,2	40,8	0,30
8	Сетунь (IV)	0,33	0,72	51	3	46	0,35
9	Раменка (III)	0,60	1,19	40	10	50	0,40
10	Городня (III)	0,69	1,24	31	14	55	0,35
11	Городня (IV)	0,65	1,25	35	13	52	0,37
12	Чертановка (III)	0,59	0,59	37	5	58	0,39
13	Ходынка (II)		0,72		100		0,45
14	Пресня (III)		0,66		100		0,55
15	Неглинка (III)		1,18		100		0,75
16	Граворонка (II)	0,12	0,39	32	36	32	0,44
17	Кровянка (II)	0,1	0,71		85	15	0,50
18	Котловка (III)	0,22	0,83	59	18	23	0,45

Примечание. I — площадь бассейна ( $\text{км}^2$ ); II — сумма длин действующих водотоков (км); III — сумма длин засыпанных водотоков (км); IV — длина современных эрозионных врезов (км); V — общая длина эрозионной сети (км); VI — густота расчленения действующими водотоками ( $\text{км}/\text{км}^2$ ); VII — густота расчленения действующими и уничтоженными водотоками ( $\text{км}/\text{км}^2$ ); VIII — густота современных эрозионных врезов ( $\text{км}/\text{км}^2$ ); IX — общая густота эрозионной сети ( $\text{км}/\text{км}^2$ ); X — количество засыпанных водотоков (в % от общей длины эрозионной сети); XI — количество современных эрозионных врезов (в % от общей длины эрозионной сети); XII — количество современных эрозионных врезов (в % от общей длины эрозионной сети); XIII — коэффициент поверхностного стока.

ных скважин. В практическом плане полезным оказалось выявление в процессе ретроспективного анализа зон с аperiодическими изменениями уровней грунтовых вод, имеющими амплитуды более 5 м и обусловленными работой водозаборов и дренажей. С такими зонами зачастую связаны допускаемые при изысканиях ошибки в определении положения уровенной поверхности грунтовых вод на перспективу, что чревато осложнениями как в процессе строительства, так и в процессе эксплуатации построенных сооружений. Возможность эффективного использования метода элементарных площадок в процессе ретроспективного анализа гидрогеодинамической обстановки иллюстрируется данными табл. 2, а также рис. 3.

Таблица 2

К сравнению величин среднемноголетних уровней грунтовых вод по данным разновременных измерений уровней в пределах элементарных площадок размером  $250 \times 250$  м с величинами, полученными по данным наблюдательных скважин

№ скв.	I	II	III	IV	Годы	Время застройки
1	156,61	156,48	3,70	2,20	1953—1957	К 1917 г.
2	157,80	157,70	3,10	3,90	1954—1967	К середине 1940-х годов
3	161,40	161,00	1,90	2,70	1949—1964	К середине 40-х
4	135,50	135,50	3,10	3,10	1948—1959	К середине 40-х
5	161,30	160,80	1,80	3,20	1940—1962	К середине 40-х
6	157,30	158,30	1,80	1,10	1957—1962	К середине 40-х
7	158,30	159,30	2,70	2,00	1954—1956	К середине 60-х
8	154,10	155,30	3,20	3,40	1951—1971	К 1917 г.
9	162,00	161,40	1,70	2,50	1940—1964	К середине XIX в.
10	143,90	143,60	4,20	3,90	1951—1964	К 1917 г.
11	152,80	153,20	2,60	2,90	1940—1955	К середине 30-х годов
12	160,00	160,0	2,00	2,40	1951—1969	К середине 30-х
13	161,75	161,90	2,00	2,24	1951—1972	К середине 40-х
14	148,50	149,10	1,50	1,10	1950—1971	К середине 30-х
15	151,60	151,50	2,10	2,00	1950—1971	К середине XIX в.
16	148,20	147,60	2,00	2,70	1956—1962	К середине XIX в.
17	117,10	117,60	4,10	3,70	1950—1972	К 1917 г.
18	121,30	121,40	2,30	2,60	1934—1976	В 60-х годах
19	120,40	119,90	2,00	3,60	1936—1950	В 60-х
20	125,10	126,00	3,50	3,00	1954—1965	В 30-х
21	130,30	130,40	1,50	1,60	1950—1970	К 1917 г.
22	161,30	161,60	4,30	3,40	1936—1975	В 60-х годах
23	151,60	151,50	2,10	2,00	1949—1973	К середине XIX в.

Приложение. I — среднемноголетние уровни грунтовых вод по данным разновременных измерений, м; II — среднемноголетние уровни грунтовых вод по данным наблюдательных скважин; III — многолетние амплитуды изменения уровней по данным разновременных измерений, м; IV — многолетние амплитуды изменения уровней по данным наблюдательных скважин, м.

Ретроспективный анализ гидрогоехимической обстановки по данным разновременных определений химического состава грунтовых вод серьезно затруднен из-за относительно малого количества необходимой информации и чрезвычайно неравномерного ее распределения по площади. Тем не менее он позволяет установить характер изменений основных показателей химизма вод (условной минерализации, содержания суль-

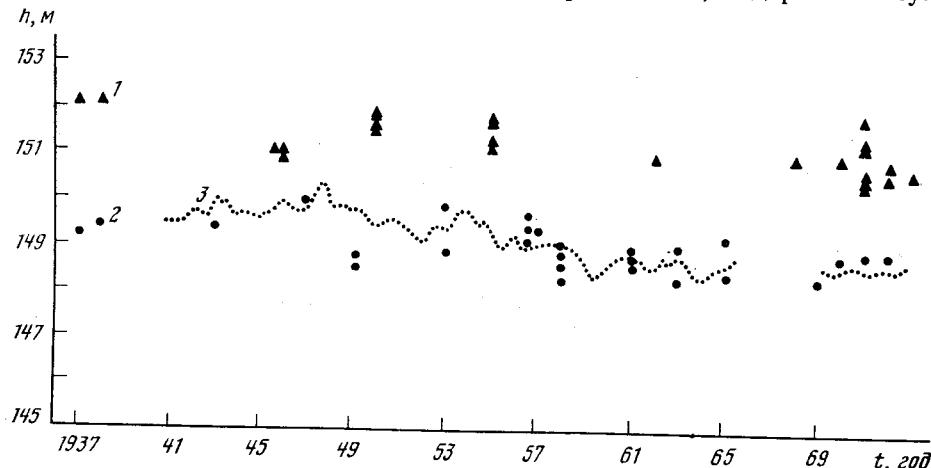


Рис. 3. Изменение абсолютных отметок уровней подземных вод  $h$  во времени  $t$  по данным разновременного бурения и наблюдений в скважине: 1 — данные разновременного бурения по первому от поверхности водоносному горизонту; 2 — данные разновременного бурения по второму от поверхности водоносному горизонту; 3 — данные замера уровней в скважине, пробуренной на второй водоносный горизонт

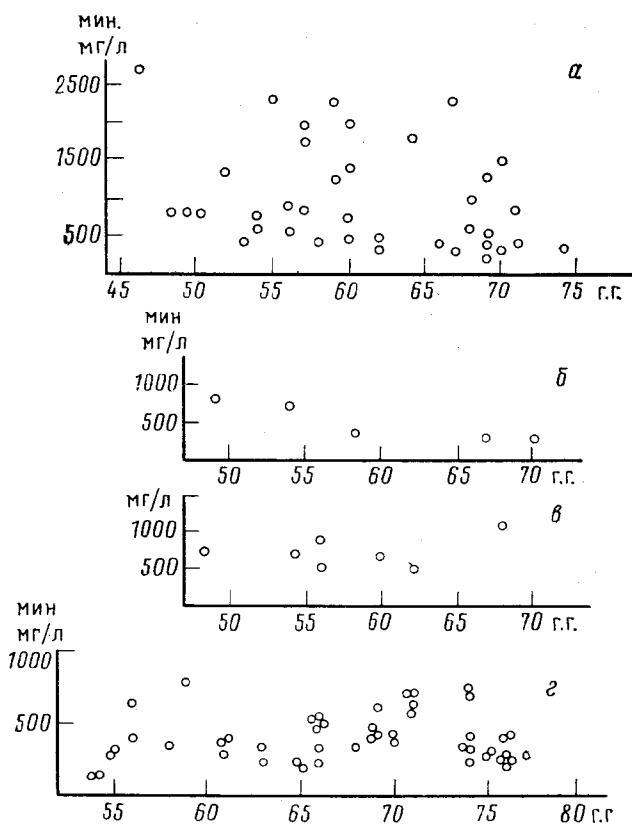


Рис. 4. Многолетние изменения минерализации грунтовых вод по данным разновременных определений: а—изменения в пределах большого квадрата (промышленная зона), б, в—изменения в пределах малых квадратов, г—изменения в пределах большого квадрата (селитебная зона)

фатных и хлоридных ионов) в пределах промышленных, селитебных и лесопарковых территорий.

Прежде всего, осуществление ретроспективного анализа позволяет выявить пространственную изменчивость химического состава вод. Например, при анализе данных единовременных определений, относящихся к площадкам городской территории размером  $250 \times 250$  м (малые квадраты), отмечается резкое изменение химического состава на относительно небольших расстояниях. Такая изменчивость гидрохимических обстановок характерна главным образом для территорий, занятых промышленными зонами и зонами старой селитебной застройки. При этом резкие изменения минерализации или состава вод наблюдаются на расстояниях, измеряемых первыми десятками метров, и тесно связаны с размещением источников загрязнения. В меньшей степени указанная изменчивость проявляется для участков в пределах селитебных и лесопарковых зон, а в пределах промышленных — при удалении точек измерений от источников загрязнения.

Результаты анализа разновременных гидрохимических определений в пределах больших (размером  $1 \times 1$  км) и малых квадратов показывают, как правило, значительно больший размах показателей по сравнению с единовременными определениями, что нередко позволяет оценить тенденцию изменений. В большинстве случаев после резкого повышения минерализации вод в начальной стадии освоения территории изменения

средних по временными интервалам величин минерализации и их дисперсий проявляется слабо. При росте во времени средних величин минерализации величины дисперсий, как правило, также растут, и уменьшаются в случае уменьшения средних (рис. 4). Выявленные закономерности справедливы как для селитебных, так и промышленно освоенных участков территории. Различие проявляется лишь в том, что в последнем случае величина минерализации грунтовых вод, как правило, выше (рис. 4, а, г). В ряде случаев удается проследить внутригодовое (в среднемноголетнем разрезе) изменение минерализации и химического состава грунтовых вод. Однако в большинстве случаев в пределах плотно застроенной части города средние величины показателей химического состава грунтовых вод слабо зависят от сезонов года (рис. 5, а—в).

Помимо очевидной пользы с позиций обоснования прогнозных моделей ретроспективный анализ в данном случае позволяет сделать заключение о неэффективности диагноза гидрогоеохимических обстановок в пределах городов способами, применяющимися для открытых незастроенных территорий, где изменчивость химического состава подземных вод в пространстве заметно меньшая. Действительно, из изложенного следует, что при реально возможном числе наблюдательных скважин в пределах города трудно рассчитывать на получение достоверной картины распределения по площади грунтовых вод, обладающих различным составом и минерализацией. Вместе с тем и разовые определения химического состава вод в процессе изысканий мало что дают для оценки на перспективу. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для формулирования правильного заключения о перспективном характере изменений гидрогоеохимической обстановки необходимо наряду с данными наблюдений, проводящихся обычным способом, использовать результаты анализа равновременных определений химического состава грунтовых вод в ретроспективе.

Результаты ретроспективного анализа свидетельствуют и о том, что оценка некоторых свойств грунтовых вод, в частности их агрессивности применительно к материалам, использующимся для строительства зданий и сооружений, должна также учитывать выявленный характер изменений. При этом возможны два основных способа такой оценки. Первый из них, гарантирующий сохранность материально-технических объектов, но связанный с большими затратами средств, предполагает проведение оценки по максимальным величинам показателей, второй — статистическую обработку имеющихся разновременных данных, установление средних показателей и в конечном счете степени риска (по отклонениям показателей химического состава грунтовых вод в неблагоприятную с позиций эксплуатации материально-технических объектов сторону).

Анализ последствий изменений геологической среды показывает, что наиболее интенсивным образом деформации зданий и сооружений проявляются при наличии изменений сразу нескольких ее компонентов. Наиболее существенным при этом является сочетание изменений рельефа (преимущественно густоты расчленения), изменений приповерхностной толщи пород при условии накопления техногенных отложений мощностью не менее 3 м, гидрогоеодинамической обстановки (снижение и повышение уровней грунтовых вод различной периодичности и с большими амплитудами). Проявление совокупности всех этих изменений, как правило, характерно для старых частей города, а также старых промышленных зон.

В заключение следует подчеркнуть, что после осуществления первого этапа, связанного с весьма трудоемкой обработкой огромного объема информации, полученной в прошлом, ретроспективный анализ в дальнейшем должен и может осуществляться на базе перманентно подготавливаемой информации о состоянии геологической среды и факторах, ее изменяющих. Выполнение такой задачи позволяет оперативно осущес-

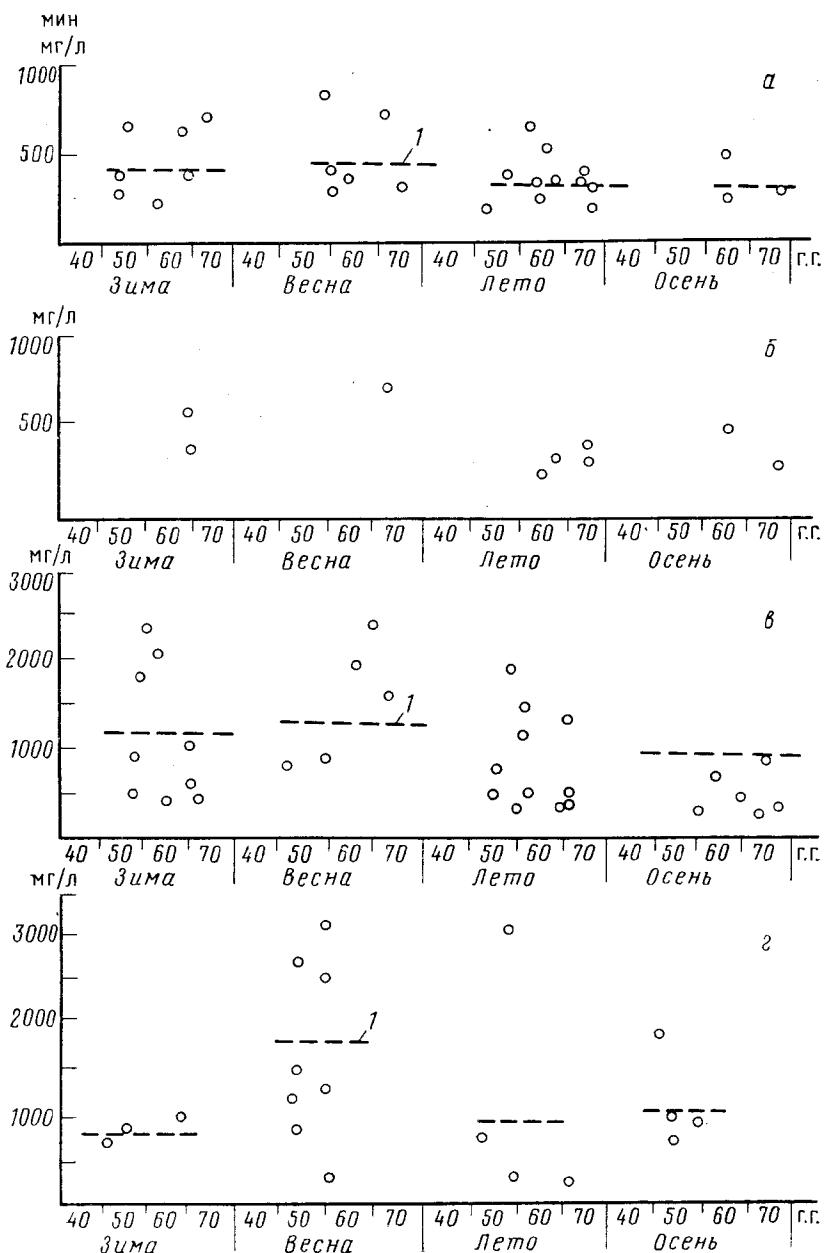


Рис. 5. Данные многолетних измерений сезонных изменений минерализации грунтовых вод: а — изменения в пределах большого квадрата (селитебная зона), б — изменения в пределах малого квадрата (селитебная зона), в — изменения в пределах большого квадрата (промышленная и селитебная зона); I — средние значения минерализации по сезонам

ставлять диагноз геологической среды, а также поисковые прогнозы и прогнозы, обосновывающие средства и пути поддержания ее состояния, благоприятные с экологических, а в конечном счете и с экономических позиций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голодковская Г. А., Зеегофер Ю. О. и др. Вопросы и методика комплексного картирования городских территорий для прогнозной оценки изменений геологической среды.— В сб.: Новые типы карт. Методы их создания. М.: Изд-во МГУ, 1983, с. 39—48.
2. Зеегофер Ю. О., Селезнев В. Н. О методике изучения изменений поверхности подземных вод на территории крупных городов.— Бюл. Моск. о-ва испыт. природы. Отд. геол., 1981, т. 56, вып. 5, с. 131—136.
3. Зеегофер Ю. О., Дубровин В. Н., Батурина И. В. Принципы оценки гидрогеохимической обстановки городских территорий на начальных этапах исследований.— В сб.: Инженерные изыскания для строительства. М., 1982, вып. 6, с. 31—35.
4. Лихачева Э. А., Зеегофер Ю. О. и др. Опыт оценки изменений рельфа городской территории (на примере г. Москвы).— В сб.: Новейшие методы геоморфологических исследований. М.: Изд-во Моск. фил. Геогр. о-ва, 1982, с. 72—84.
5. Лихачева Э. А., Зеегофер Ю. О., Панюкова М. П. Геоморфологический анализ территории г. Москвы (оценка степени благоприятности для строительства).— В сб.: Рельеф и хозяйственная деятельность. М.: Изд-во Моск. фил. Геогр. о-ва, 1982, с. 112—122.
6. Лихачева Э. А., Бгатов Ан. П., Краснов А. Ф. Особенности современных геоморфологических процессов на территории города.— В сб.: Современное эзогенное рельефообразование, его изучение и прогноз. М.: Изд-во Моск. фил. Геогр. о-ва, 1984, с. 32—43.

Институт литосферы АН СССР

Поступила в редакцию  
15.II.1985

УДК 624.131.1 : 624.131.24

ОСИПОВ В. И., НГҮЕН НГОК БИК, РУМЯНЦЕВА Н. А.

**ЦИКЛИЧЕСКАЯ НАБУХАЕМОСТЬ ГЛИН****Введение**

Набухание является широко распространенным в природе процессом, связанным с увлажнением глинистой породы и увеличением ее объема. Существующие в нашей стране государственный стандарт [2] и методические руководства [4, 9] предусматривают определение показателей набухаемости на грунтах природного и нарушенного сложения путем их однократного (разового) увлажнения. Между тем в природных условиях глинистые грунты часто находятся в условиях переменного влажностного режима и испытывают многократное (циклическое) набухание и усадку, что существенным образом влияет на их состояние и свойства. Последнее подтверждается рядом фактов, известных из литературы, в которых описываются деформации инженерных сооружений, обусловленные неоднократным замачиванием глин в их основании [1, 3, 10]. Наиболее часто циклическое набухание испытывают глинистые грунты в бортах карьеров, выемок, на природных склонах, а также на дне котлованов.

Несмотря на ряд интересных исследований, выполненных Ж. Е. Рогаткиной [8], Л. В. Передельским [7], К. М. Пановой [6], Ю. Б. Осиповым с коллегами [5] и др., общие закономерности набухаемости глинистых грунтов при их циклическом увлажнении и высушивании до настоящего времени остаются плохо изученными. Учитывая большую научную и практическую значимость этого вопроса, авторы поставили задачу изучить циклическую набухаемость глин и расширить наши представления о механизме и основных закономерностях развития этого процесса.

**Характеристика объектов и методики исследований**

Для решения поставленной задачи было взято несколько глинистых грунтов из различных регионов нашей страны и различающихся между собой по генезису, возрасту и степени литификации. Всего было отобрано пять разновидностей глин, характеристика которых представлена в таблице.

Комплексные исследования показали, что среди взятых глин можно выделить четыре структурных типа, различающихся по характеру контактов между структурными элементами: 1) с преобладанием дальних коагуляционных контактов — современные морские илы, 2) с преобладанием близких коагуляционных контактов — верхнечетвертичная озерно-ледниковая глина, 3) с переходными контактами — верхнечетвертичная морская (хвалынская) глина, 4) со смешанными (коагуляционными и цементационными) контактами — морские: плиоценовая (обозинская) и верхнекарбоновая (гжельская) глины. При изучении микростроения с помощью растрового электронного микроскопа было установлено, что почти все глины обладают ориентацией структурных элементов по направлению напластования. Наиболее ориентированную микротекстуру имеют хвалынская и озерно-ледниковая глины.

Изучение набухаемости взятых образцов проводили по методике свободного набухания в приборах Васильева при комнатной температуре

**Характеристика исследованных грунтов**

Грунт и место его отбора	Группа по классификации	Минеральный состав глинистой фракции (в скобках содержание минерала, %)	Изотермическое сжатие, $r/cm^3$	Изотермическое сжатие, $r/cm^3$	Несущая способность земляного полога, %	Несущая способность земляного полога, $r/cm^3$	Сцепление с горючим, %	Сцепление с горючим, %	Износостойкость бурового инструмента, $m/m$	Износостойкость бурового инструмента, $m/m$	Износостойкость кернера, $r/cm^3$	Износостойкость кернера, $r/cm^3$	Минеральный состав глинистых фракций (в скобках содержание минерала, %)	Коэффициент трения, $\mu$	Коэффициент трения, $\mu$	Преображеный тип контактов между структурными элементами	
Морской глинистый ил (Днепровско-Бугский лиман)	m IV	23	Гидрослюд (50), смешанослойные (35), каолинит (10—12), хлорит (3—5)	1,43	0,68	75	111	1,0	59	22	0,02	6	Дальний коагуляционный	Yor BHYTPEHHeRo	GeutehHee, Mta	Yor BHYTPEHHeRo	Преображеный тип контактов между структурными элементами
Озерно-ледниковая глина на тяжелая (р-н г. Новогорода)	Ig III <sub>4</sub>	40	Гидрослюд (60—70), смешанослойные (15), каолинит (13—15), хлорит (7—8)	1,95	1,43	47	35	1,0	49	23	0,035	14	Ближний коагуляционный				
Морская глина средняя (оболдинская сугна, Северный Кавказ)	mP <sub>2</sub>	32	Монтмориллонит (50), смешанослойные (50)	2,08	1,70	41	24	0,91	74	47	0,18	22	Смешанный (коагуляционный и цементационный)				
Морская хвильнская глина тяжелая (Нижнее Поволжье)	m III <sub>4</sub>	60	Гидрослюд (50—60), смешанослойные (15), монтмориллонит (10—12), каолинит (12—15), хлорит (10)	1,94	1,47	47	32	0,98	63	36	—	—	Переходный				
Морская глина средняя (гжельский ярус, Московская обл.)	C <sub>3</sub>	26	Гидрослюд (60), смешанослойные (30), хлорит (5), каолинит (5)	2,07	1,72	37	20	0,95	49	25	0,43	22	Смешанный (коагуляционный и цементационный)				

24

( $T=20-25^{\circ}\text{C}$ ). Испытания выполняли по двум схемам. В первой схеме (н—у—н) опыт начинался с набухания образцов естественной влажности и сложения. После достижения стабилизации набухания проводили высушивание образцов на воздухе до первоначальной (естественной) влажности, после чего опыт переходил на второй цикл и проводили новое увлажнение. Так продолжалось до достижения постоянного значения величины набухаемости  $R_n'$  после какого-то количества циклов набухания — усадки. Все операции по подготовке образцов, их увлажнению и определению набухаемости выполняли в соответствии с существующим ГОСТом [2]. Набухаемость каждой глины изучали не менее чем на 12 пробах, отобранных из одного монолита, из которых шесть проб вырезали в направлении, перпендикулярном слоистости, и столько же в направлении, параллельном слоистости. Кроме того, испытывали шесть проб нарушенного сложения с плотностью и влажностью, аналогичными пробам с ненарушенным сложением. После усреднения полученных данных по взятым пробам рассчитывали величину свободной набухаемости для каждого цикла увлажнения:

$$R_n^n = \frac{h_n^n - h_0}{h_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $R_n$  — относительная набухаемость для  $n$ -цикла в %,  $h_n^n$  — высота образца после  $n$ -цикла увлажнения,  $h_0$  — высота исходного образца перед началом опыта. Одновременно находили значения влажности набухания  $W_n$ .

Вторая схема испытаний (у—н—у) предусматривала изучение поведения глинистых грунтов в экстремальных условиях их увлажнения и высушивания. Испытание по этой схеме начинали с высушивания образцов на воздухе до влажности усадки, затем проводили их увлажнение. После завершения набухания цикл повторялся, и так продолжалось до достижения постоянного значения  $R_n'$ . Подготовка и количество испытуемых проб были такими же, как при испытании по схеме н—у—н.

Помимо свободной набухаемости изучали давление циклического набухания  $P_n'$ , величину которого находили с помощью компрессионных приборов по стандартной методике [2]. Для этого серию проб доводили до нужного цикла набухания, после чего каждую пробу испытывали при различной внешней нагрузке. Так находили  $P_n$  для первого и конечного циклов набухания и оценивали влияние циклического увлажнения — высушивания на давление набухания.

Исходные пробы грунта (до набухания) и пробы после конечного цикла набухания подвергали тщательным микроструктурным исследованиям. Количественный анализ микростроения осуществляли с помощью метода и установки, разработанных на кафедре грунтоведения и инженерной геологии МГУ на базе растрового электронного микроскопа и микро-ЭВМ [4]. В результате этих исследований находили распределение пор по размерам и оценивали ориентацию структурных элементов до набухания и после набухания на первом и последнем циклах увлажнения — высушивания.

### Свободная набухаемость глин при их циклическом увлажнении и высушивании

Как видно из рис. 1, при испытании по схеме н—у—н, величина  $R_n$  всех изученных глин возрастает по экспоненте с увеличением количества циклов, достигая своего максимального значения при каком-то цикле, после чего остается неизменной. Подобное изменение  $R_n$  отмечается у образцов как ненарушенного, так и нарушенного сложения с той только разницей, что в нарушенном сложении глины достигают вели-

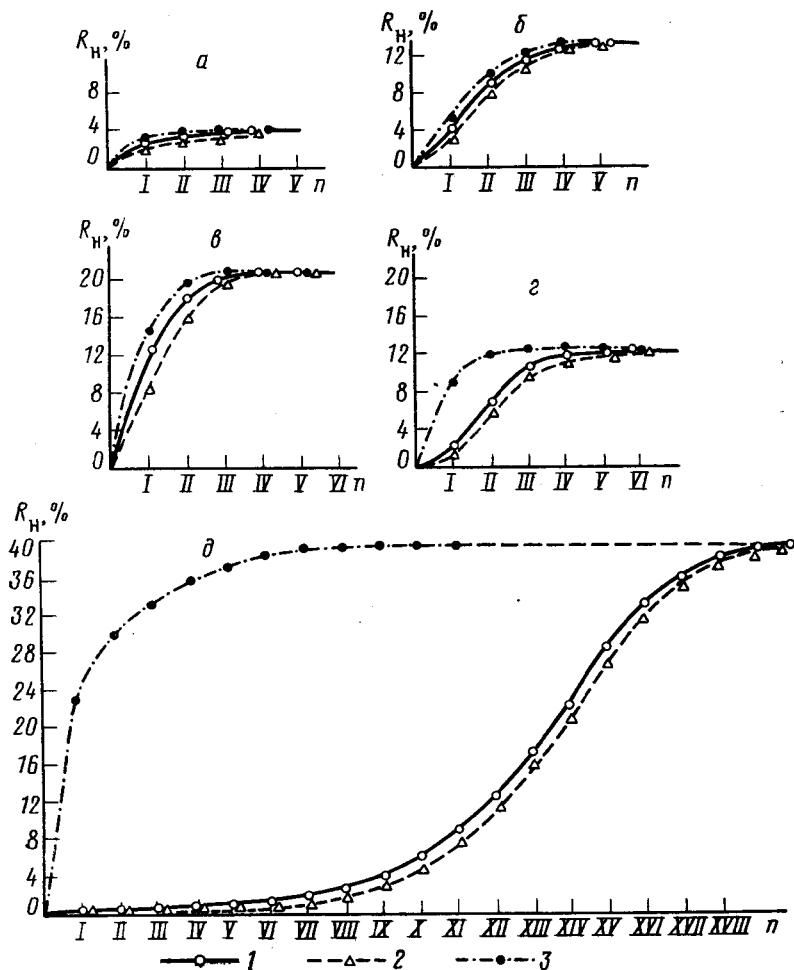


Рис. 1. Графики зависимости набухаемости  $R_H$  от количества циклов увлажнения и высушивания  $n$  при испытании по схеме набухание — усадка — набухание ( $н — у — н$ ) для морских илов (а), озерно-ледниковых ленточных глин (б), морских хвальинских глин (в), морских гжельских глин (г) и морских ободзинских глин (д): 1 — набухание в ненарушенном сложении в направлении, перпендикулярном напластованию; 2 — набухание в ненарушенном сложении в направлении, параллельном напластованию; 3 — набухание в нарушенном сложении

чины максимальной набухаемости при меньшем количестве циклов, чем в ненарушенном сложении. Количество циклов, при котором достигается максимальная набухаемость, не остается постоянным, а зависит от типа структурных связей. При этом отмечается следующая закономерность: с увеличением прочности структурных связей количество циклов увлажнения и высушивания, необходимое для достижения максимальной набухаемости, увеличивается. Так, например, илы, для которых характерно преобладание дальних коагуляционных контактов, достигают максимальной набухаемости в нарушенном и ненарушенном сложении на IV цикле (рис. 1, а).

Озерно-ледниковые глины с близкими коагуляционными контактами достигают максимальной набухаемости в ненарушенном сложении на V цикле, а в нарушенном — на IV цикле (рис. 1, б). Системы с переходными контактами, к которым относятся хвальинские глины, достигают максимального значения  $R_H$  в ненарушенном сложении также на V цикле, а при нарушении естественного сложения — на III цикле

(рис. 1, в). Наибольшее количество циклов увлажнения и высушивания требуется для достижения максимальной набухаемости у глин со смешанным типом контактов: у морских гжельской и ободзинской глин максимальное значение  $R_n$  в ненарушенном сложении достигается соответственно на VI и XX циклах, а в нарушенном — на III и VII циклах (рис. 1, г и д).

Влияние типа структурных связей глин на характер циклического набухания особенно показательно при рассмотрении относительного приращения величины набухаемости с ростом циклов. Как видно из рис. 2, у илов и озерно-ледниковых глин, у которых преобладают малопрочные дальние и близкие коагуляционные контакты, наибольший относительный рост набухаемости наблюдается на первых циклах, а у гжельских глин со смешанным типом контактов относительное приращение набухаемости развивается постепенно с увеличением числа циклов. При этом, как видно из рис. 1, у систем с близкими и дальними коагуляционными контактами нарушение природного сложения оказывается несущественно на характере набухания по сравнению с их набуханием в ненарушенном сложении. У хвальинских глин с переходным типом контактов это различие несколько возрастает, и особенно ярко оно проявляется у глин со смешанным типом контактов.

Следует отметить, что у всех глин в ненарушенном сложении набухаемость образцов в направлении, перпендикулярном слоистости, несколько больше, чем по направлению слоистости, что объясняется наличием ориентации структурных элементов по направлению напластования. Этот эффект наиболее заметно проявляется у озерно-ледниковых и хвальинских глин, имеющих относительно высокую степень ориентации частичек.

Изучение циклической набухаемости глин по схеме усадка — набухание — усадка ( $у-н-у$ ) показало, что общие закономерности изменения  $R_n = f(n)$  остаются такими же, как и при испытании по схеме  $н-у-н$  (рис. 3). Вместе с тем имеется ряд особенностей, отличающих циклическое набухание глин при их испытании по этим двум схемам. Эти отличия выражаются, во-первых, в том, что максимальная величина набухаемости  $R_n'$  у всех глин (за исключением илов) при испытании по схеме  $у-н-у$  в 1,3—2,0 раза выше, чем при испытании по схеме  $н-у-н$  (см. рис. 1 и 3). Вторым отличием является то, что максимальная величина набухаемости  $R_n'$  при испытании по схеме  $у-н-у$  достигается при меньшем количестве циклов высушивания — увлажнения, чем при испытании по схеме  $н-у-н$ . У озерно-ледниковых глин она достигается на III цикле (рис. 3, б), у хвальинских глин — на IV цикле (рис. 3, в), а у гжельских и ободзинских глин — соответственно на IV и VI циклах (рис. 3, г, д).

Такое поведение глин при их испытании по схеме  $у-н-у$  объясняется тем, что при глубоком высушивании образцов в них возрастают внутренние напряжения, которые вызывают более быстрое разрушение прочных контактов по сравнению с испытаниями по схеме  $н-у-н$ . Кроме того, при увлажнении высушенных образцов в них образуется защемленный воздух, который создает дополнительное внутреннее (поро-

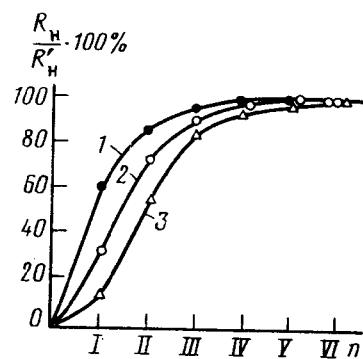


Рис. 2. Зависимость относительного приращения набухаемости от количества циклов для илов (1), ленточных глин (2) и гжельских глин (3):  $R_n$  — набухаемость на  $n$ -цикле;  $R'_n$  — величина максимальной набухаемости

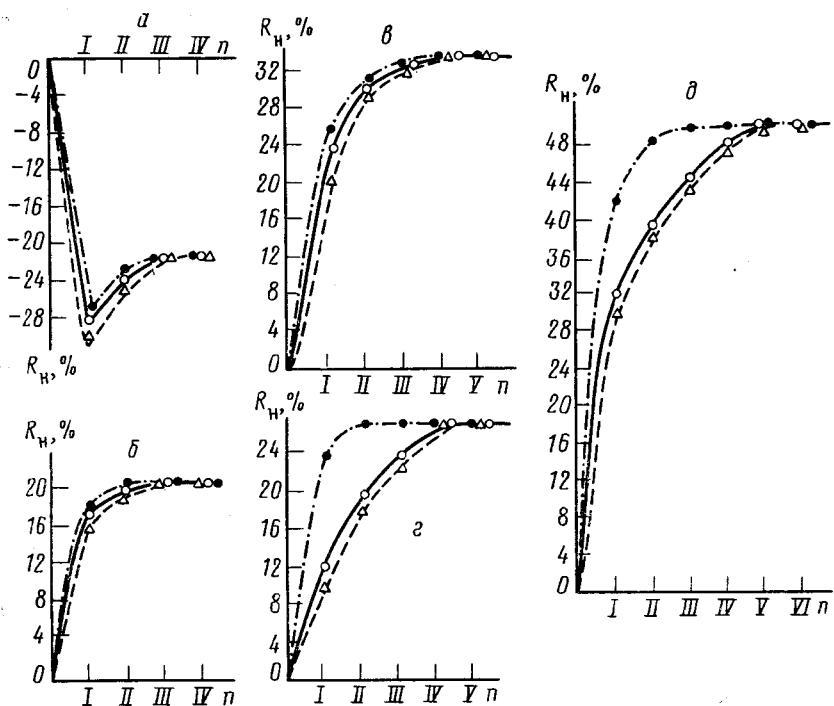


Рис. 3. Графики зависимостей набухаемости глин  $R_H$  от количества циклов увлажнения и высушивания  $n$  при испытании по схеме усадка — набухание — усадка (у — н — у). Усл. обозн. см. рис. 1

вое) давление, способствующее более сильному разуплотнению глины при увлажнении. Об образовании защемленного воздуха в глине при ее увлажнении после глубокого высушивания свидетельствует тот факт, что степень водонасыщения глин  $K_w$  в набухшем состоянии при испытании по схеме у—н—у никогда не достигает единицы, в то время как при

набухании по схеме н—у—н она всегда близка к единице (рис. 4).

Исключением из рассмотренных выше глинистых грунтов являются илы, которые при испытании по схеме у—н—у показывают не увеличение значения  $R_H$ , а его уменьшение по сравнению с данными испытаний по схеме н—у—н (рис. 3, а). Подобное поведение илов связано, очевидно, с тем, что при дегидратации в них происходят необратимые изменения структуры и химико-минерального состава, которые приводят к снижению величины набухаемости.

Интересные результаты были получены при изучении изменения влажности набухания глин при их циклическом увлажнении и высушивании (рис. 5). Эти исследования показали, что все глины (за исключением илов) при циклическом набухании приобретают постоянную весовую влажность —  $W'_H$ , величи-

Рис. 4. Зависимость степени водонасыщения  $K_w$  хвальинских глин от количества циклов увлажнения и высушивания  $n$ : 1 — при испытании по схеме н — у — н; 2 — при испытании по схеме у — н — у

на которой не зависит от типа структурных связей, исходного состояния грунта (плотности, влажности) и схемы испытания. Это дает основание считать, что значение  $W'_H$  определяется исключительно составом

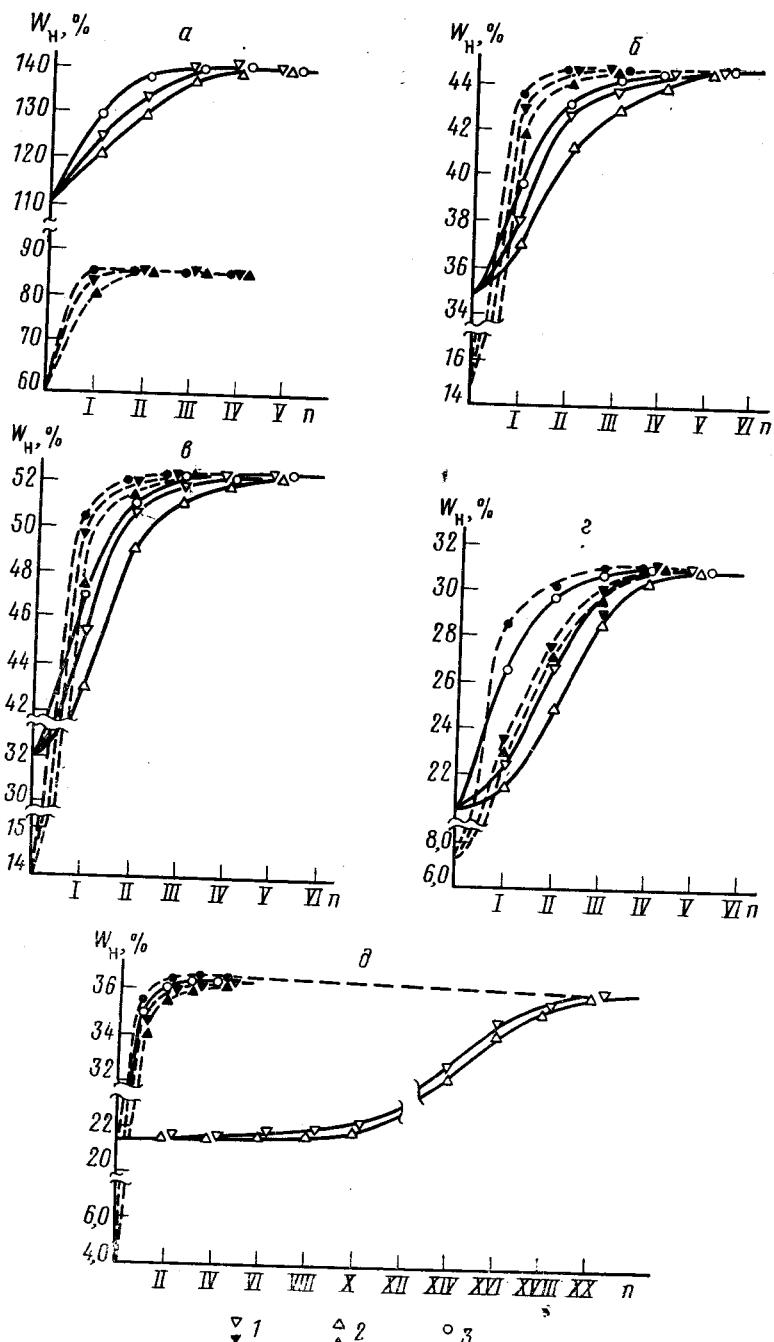


Рис. 5. Графики зависимости влажности набухания  $W_H$  от количества циклов увлажнения и высушивания  $n$  при испытании по схеме н — у — н (сплошные линии) и лу — н — у (пунктирные линии). 1 — набухание в ненарушенном сложении в направлении, перпендикулярном напластованию; 2 — набухание в ненарушенном сложении в направлении, параллельном напластованию; 3 — набухание в нарушенном сложении. Остальные обозначения см. рис. 1

грунта и физико-химическими условиями, в которых происходит набухание (температура, состав раствора, pH раствора и т. д.).

Следует отметить, что предельная влажность набухания является величиной постоянной для данного грунта только при выражении ее в ве-

совых единицах. При выражении предельной влажности набухания в объемных единицах получаемое значение будет зависеть от степени заполнения пор водой и, таким образом, меняться при испытаниях по разным схемам.

### Циклическая набухаемость глин под нагрузкой и давление набухания

Помимо свободной набухаемости было проведено изучение набухаемости глинистых грунтов под нагрузками и определение давления набухания в зависимости от количества циклов увлажнения и высушивания грунта. Эти исследования показали, что давление набухания различных глинистых грунтов увеличивается по мере возрастания числа циклов (рис. 6). При этом характер изменения давления набухания с ростом количества циклов очень сходен с динамикой процесса свободного набухания. Как видно из приведенных графиков (рис. 6), при испытании по схеме н—у—н давление набухания на конечном цикле увлажнения существенно больше по сравнению с давлением набухания на первом цикле. Так, оно возрастает у гжельских глин в 2,6 раза, у хвалынских глин в 1,2 раза, а у озерно-ледниковых в 1,8 раза.

При испытании по схеме у—н—у величина давления набухания в 1,2—2,5 раза выше, чем при испытании по схеме н—у—н, что можно объяснить, как уже говорилось выше, образованием в грунте защемленного воздуха и повышением за счет этого внутреннего давления в грунте.

Важным отличием развития циклического набухания под нагрузками является то, что конечная (максимальная) величина набухаемости образцов в ненарушенном сложении зависит от характера ориентации структурных элементов, а значение  $R_n'$  в нарушенном сложении всегда больше, чем в ненарушенном. Такая же закономерность отмечается и у давления набухания. Как видно из рис. 6, независимо от схемы испытания давление набухания у образцов с ненарушенным сложением, вырезанных перпендикулярно напластованию, остается всегда выше по сравнению с образцами, вырезанными параллельно напластованию, т. е. при циклическом набухании под нагрузкой грунты сохраняют анизотропию набухаемости и давления набухания.

При нарушении природного сложения давление набухания возрастает и остается на протяжении всех циклов испытания выше давления набухания образцов с ненарушенным сложением. Подобное явление объясняется структурной перестройкой грунта в процессе набухания, которая будет рассмотрена ниже.

### Микроструктурные изменения в глинах при циклическом набухании

Анализ фотографий микростроения глин, полученных под растровым электронным микроскопом до набухания (исходные образцы) и после их циклического набухания, показывает, что увеличение набухания при периодическом увлажнении и высушивании глинистых грунтов сопровождается существенной перестройкой их микростроения. Характер и величина этих изменений у каждой глины имеют свои особенности и зависят от состава породы и характера структурных связей. Вместе с тем у всех исследованных глин проявляются общие тенденции в изменении микростроения, которые будут рассмотрены ниже на примере озерно-ледниковых и хвалынских глин при их циклическом набухании по схеме н—у—н.

Исходные образцы озерно-ледниковых глин имели ламинарное микростроение, характеризующееся заметной ориентацией структурных элементов в плоскости, близкой к плоскости напластования (рис. 7, а, б).

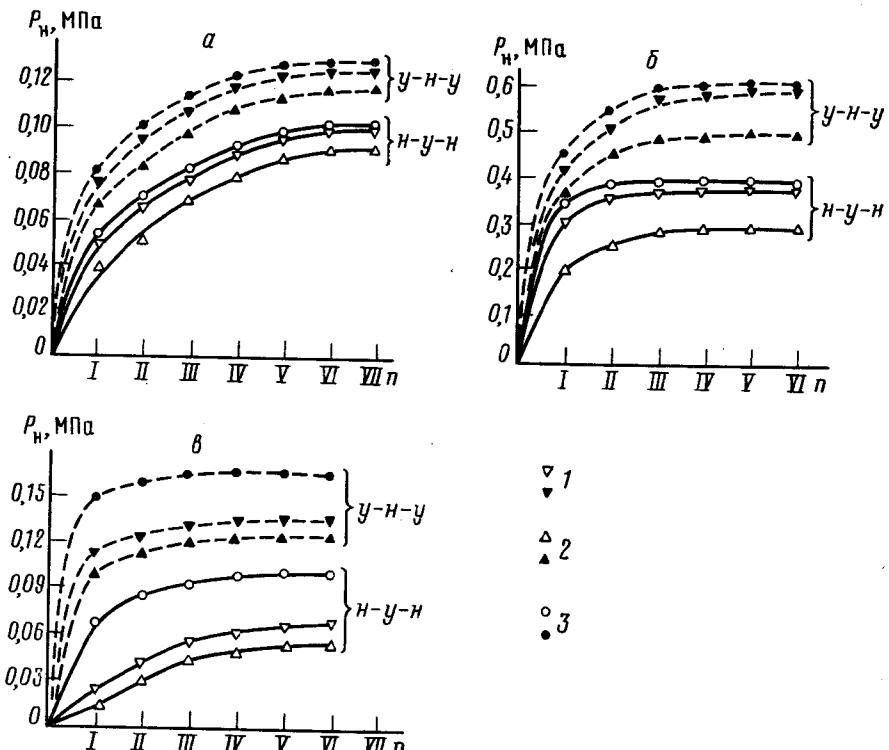


Рис. 6. Графики зависимостей давления набухания  $P_n$  от количества циклов увлажнения и высушивания  $n$  для ленточных (а), хвальинских (б) и гжельских (в) глин. 1 — набухание в ненарушенном сложении в направлении, перпендикулярном напластованию; 2 — набухание в ненарушенном сложении в направлении, параллельном напластованию; 3 — набухание в нарушенном сложении

Наличие ориентации структурных элементов обусловливает значительную анизотропию величины набухаемости этой глины на первых циклах увлажнения — высушивания (рис. 8, а), определяемую как отношение свободной набухаемости в направлении, перпендикулярном напластованию  $R_{n\perp}$ , к ее значению в направлении, параллельном напластованию  $R_{n\parallel}$ . Как показал качественный анализ пор по размеру, для исходного образца характерно одномодальное распределение пор с размером от долей микрометра до 22 мкм с экстремумом в области около 2 мкм (рис. 9, а, сплошная линия).

После первого цикла набухания микростроение озерно-ледниковых глин заметно изменяется. Как видно из рис. 7, в, происходит увеличение пористости глины — наряду с мелкими вытянутыми порами, характерными для исходного образца, появляются более крупные, имеющие форму, близкую к изометричной. Последнее подтверждается количественными данными по распределению пор по размеру (рис. 9, а, пунктирная линия), из которых видно, что происходит относительное увеличение содержания более крупных пор, за счет чего график распределения смещается вправо, а его экстремум соответствует порам с размером около 4 мкм. Одновременно отмечается снижение степени ориентации структурных элементов (рис. 7, г) и разрушение крупных глинистых агрегатов, приводящее к их расслоению и образованию внутриагрегатных щелевидных пор.

При увеличении циклов увлажнения — высушивания происходят дальнейшие микроструктурные изменения, выражющиеся в полном разрушении крупных микроагрегатов и переориентации структурных элементов. Так, к V циклу, при котором достигается максимальная свобод-

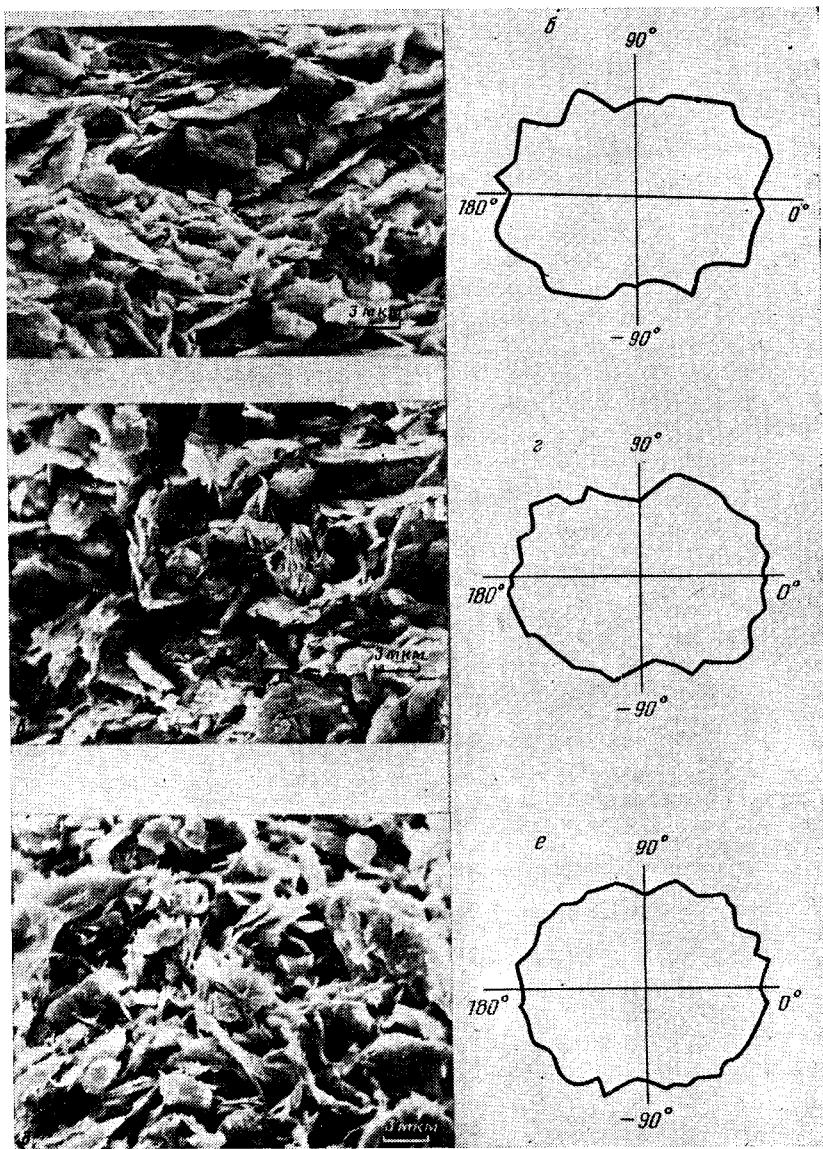


Рис. 7. Микростроение озерно-ледниковой глины и розы ориентации структурных элементов: *а, б* — исходный образец до набухания; *в, г* — после I цикла набухания; *д, е* — после V цикла набухания

ная набухаемость, глина превращается в высокопористую, диспергированную систему (рис. 7, *д*), поровое пространство которой образовано преимущественно изометричными порами, имеющими форму многогранников или округлых ячеек. Как видно из гистограммы распределения пор по размеру (рис. 9, *а*, точечная линия), преобладающее количество пор находится в диапазоне от 2 до 8 мкм, при этом поровое пространство становится более однородным за счет разрушения микроагрегатов и исчезновения крупных межагрегатных пор. Одновременно отмечается повышение степени разориентации структурных элементов, и к V циклу микротекстура глины становится практически неориентированной (рис. 7, *е*). Следствием этого является постепенное снижение коэффициента анизотропии набухаемости, величина которого становится равной единице при достижении максимальной набухаемости глины (рис. 8, *а*).

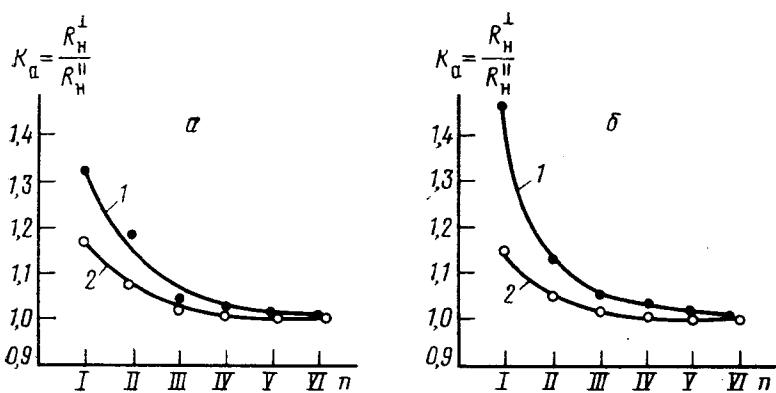


Рис. 8. Зависимость анизотропии набухаемости озерно-ледниковой (а) и хвальинской (б) глин от циклов увлажнения — высушивания. Испытание по схеме н — у — н (1) и у — н — у (2)

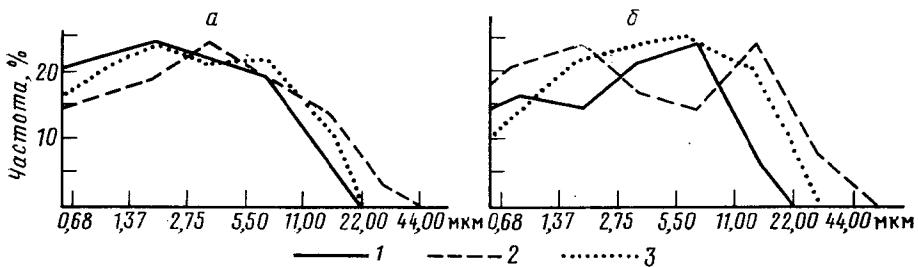


Рис. 9. Гистограммы распределения пор по размеру озерно-ледниковой (а) и хвальинской (б) глин: 1 — исходный образец; 2 — после I цикла набухания; 3 — после V цикла набухания

Изучение микростроения хвальинской глины показало, что исходный образец имеет турбулентную структуру, характеризующуюся высокой степенью агрегированности структурных элементов и ориентацией микроагрегатов в плоскости, расположенной примерно под углом 15—18° к плоскости напластования (рис. 10, а, б). Большинство пор имеет вытянутую анизометрическую форму, причем, как видно из гистограммы распределения пор (рис. 9, б, сплошная линия), выделяются два преобладающих размера пор: первый около 1 мкм, соответствующий, очевидно, внутриагрегатным порам, и второй около 8 мкм, соответствующий межагрегатным порам.

После первого увлажнения хвальинской глины отмечается разуплотнение структуры (рис. 10, в), ее расслаивание по напластованию и появление вытянутых (щелевидных) крупных пор, разбухание и частичное разрушение крупных микроагрегатов. На кривой распределения пор по размеру бимодальный характер гистограммы становится более выраженным, причем преобладающий размер межагрегатных пор смещается в область 16 мкм, а внутриагрегатных — 2 мкм (рис. 9, б, пунктирная линия). Ориентация структурных элементов в целом сохраняется высокой (рис. 10, г) и даже несколько возрастает за счет расслаивания структуры по напластованию.

Произошедшие после первого цикла микроструктурные изменения приводят к разрушению части относительно прочных переходных контактов в глине и увеличению ее потенциальной способности к набуханию, что в свою очередь вызывает новые, более глубокие микроструктурные перестройки на последующих циклах увлажнения — высушивания. Действительно, исследование микростроения хвальинской глины после V цикла набухания показало, что в ней возросло количество изометрич-

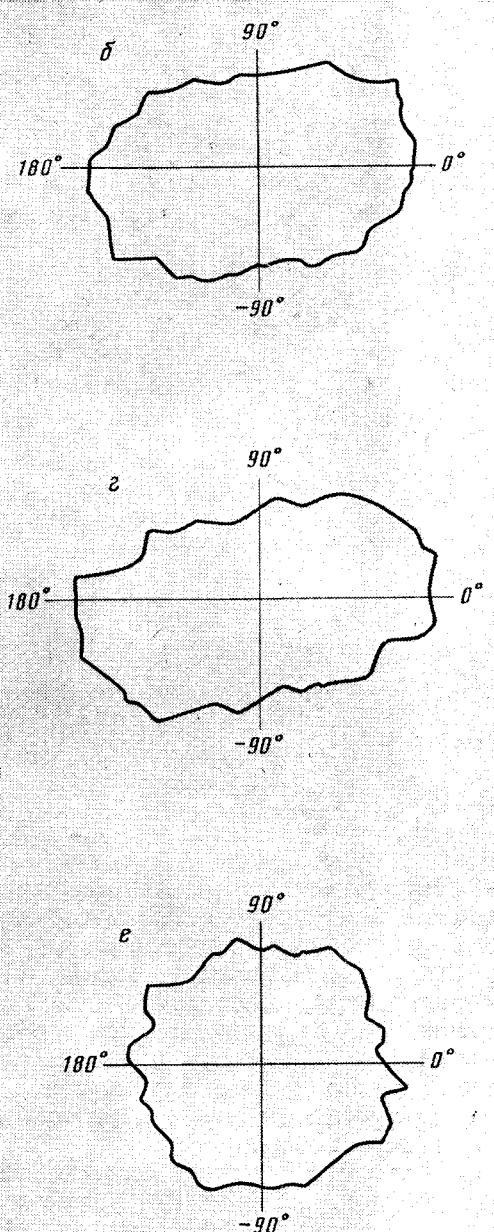
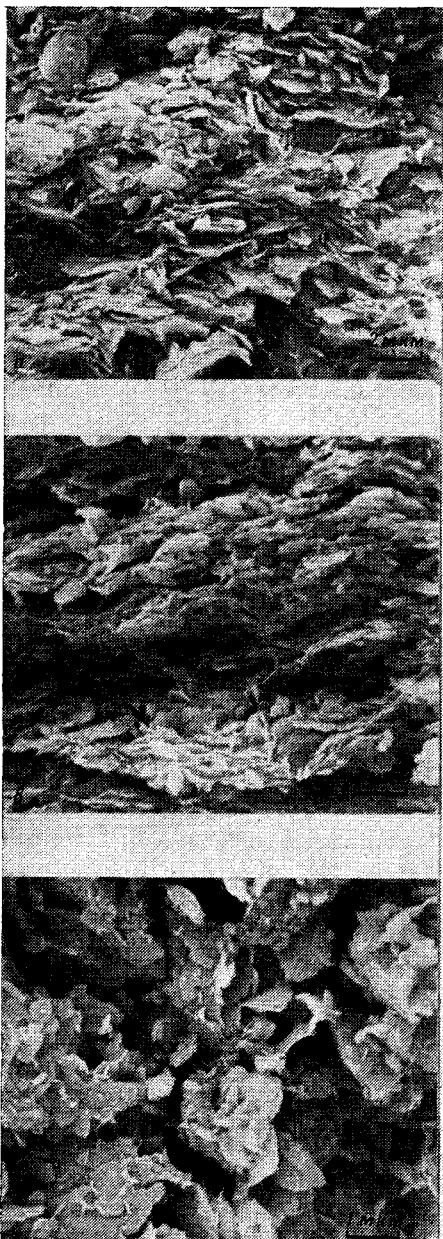


Рис. 10. Микростроение хвалынской глины и розы ориентации структурных элементов: а, б — исходный образец; в, г — после I цикла набухания; д, е — после V цикла набухания

ных пор со средним размером около 6 мкм (рис. 9, б, точечная линия). Поровое пространство стало более однородным, уменьшилось содержание наиболее крупных и наиболее мелких пор. С увеличением числа циклов набухания происходит все более глубокое разрушение крупных агрегатов и разориентация структурных элементов. После V цикла микротекстура хвалынской глины становится практически неориентированной (рис. 10, е), анизотропия набухаемости исчезает (рис. 8, б), структурные элементы контактируют преимущественно по типу базис — скол, отмечается тенденция к образованию ячеистой микроструктуры, характерной для диспергированных систем с коагуляционными контактами.

## Заключение

Выполненные исследования показали, что свободная набухаемость глин при разовом увлажнении зависит от типа структурных связей и состава грунта, причем роль первого фактора возрастает с увеличением степени литификации глины. При проведении циклических испытаний происходит разрушение прочных контактов между структурными элементами и их трансформация в менее прочные близкие и дальние коагуляционные контакты, что обуславливает постепенное увеличение набухаемости. Одновременно в процессе циклического набухания идет структурная перестройка глин, направленная на диспергацию микроАгрегатов и разориентацию структурных элементов, приводящая к увеличению энтропии системы и исчезновению анизотропии ее набухаемости. При достижении полного разрушения прочных контактов, а также предельной диспергации и разориентации структурных элементов глина показывает максимальную набухаемость  $R_n'$ , величина которой в дальнейшем не изменяется с увеличением циклов увлажнения — высушивания. Количество циклов, необходимых для достижения  $R_n'$ , при испытании по схеме н—у—н возрастает с ростом степени литификации глин и изменяется от 3—4 (современные илы) до 6—20 (палеогеновые и карбоновые литифицированные глины). При этом набухаемость увеличивается от 1,3 до 10 и более раз по сравнению с ее значением при разовом набухании. При проведении испытаний по схеме у—н—у величина набухаемости возрастает еще больше, а количество циклов, необходимых для достижения максимальной набухаемости, несколько снижается. Это объясняется тем, что при замачивании глины после ее высушивания до влажности усадки в ней образуется защемленный воздух, вызывающий повышение внутреннего давления и общей набухаемости глины.

Для количественной оценки влияния степени литификации глин на их набухаемость целесообразно ввести показатель циклической набухаемости ( $K_n$ ), численно равный отношению максимальной набухаемости на  $n$ -м цикле ( $R_n'$ ) к величине набухаемости на первом цикле ( $R_n$ ):  $K_n = R_n'/R_n$ . Ранее Шмертманом [11] был введен так называемый показатель чувствительности к набуханию, который численно находится как отношение величины набухаемости грунта в нарушенном сложении к его набухаемости в ненарушенном сложении. Поскольку величина разовой набухаемости в нарушенном сложении не отражает потенциальную способность грунта к набуханию и по своей величине всегда остается ниже значения максимальной набухаемости грунта при его циклическом увлажнении и высушивании ( $R_n'$ ), то показатель, предложенный Шмертманом, лишен физического смысла и не может характеризовать влияние типа структурных связей (или степени литификации глинистых грунтов) на величину их разовой набухаемости. Расчет величины показателя циклической набухаемости для исследованных нами глин показал, что значение  $K_n$  изменяется от 1,8 (современные илы) до 98 (морские ободзинские глины), т. е. закономерно возрастает по мере перехода от слаболитифицированных глинистых отложений с дальными коагуляционными контактами к литифицированным глинам со смешанным типом контактов.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при разовом набухании глинистая система не достигает своего равновесного состояния. Последнее наступает только в результате циклического увлажнения и высушивания, когда происходит диспергация и разориентация структурных элементов, сопровождающаяся максимальным объемным изменением системы в целом. Этому состоянию соответствует минимальное значение внутренней энергии глины и максимальное содержание связанной воды. Интересно, что перемятие грунта не приводит систему в равновесное состояние и не позволяет определить ее максимальную набухаемость.

Для этого необходимо 3—4 цикла увлажнения и высушивания, в течение которых происходит «доразрушение» структуры и разориентация ее структурных элементов.

Глина в равновесном состоянии характеризуется максимальной влажностью набухания  $W_n'$ , значение которой является постоянным для каждого грунта в данных физико-химических условиях и не зависит от его плотности и влажности в естественном залегании, а также схемы проведения циклических испытаний. Поэтому величину  $W_n'$  можно рассматривать как показатель, характеризующий глинистую структурированную систему в ее предельно рыхлом состоянии с «нулевой» степенью литификации. По мере уплотнения глины в ходе литогенеза идет упрочнение ее структурных связей, снижение водосодержания и увеличение разности между естественной влажностью  $W_e$  (в водонасыщенном состоянии) и величиной  $W_n'$ . По величине отношения  $W_e/W_n'$  можно, очевидно, судить о том, какая доля внутренней энергии глины реализована за счет ее гидратации в условиях естественного залегания. При таком рассмотрении отношение  $W_e/W_n'$  принимает важный термодинамический смысл: чем меньше это отношение, тем больше запас внутренней энергии в грунте и тем выше степень его литификации. Следует ожидать, что величина  $W_e/W_n'$  будет хорошо коррелировать с физико-механическими свойствами глинистых пород.

Наряду со свободной набухаемостью с увеличением числа циклов увлажнения и высушивания возрастают набухаемость под нагрузкой и давление набухания. Величина последнего увеличивается в 1,2—2,6 раза по сравнению с давлением при разовом набухании. При этом максимальная величина давления набухания  $P_n'$  зависит от первоначальной ориентации структурных элементов грунта и существенно возрастает при перемытии образцов. Такое явление объясняется тем, что при набухании в условиях существования внешнего давления разрушение микроагрегатов и разориентация структурных элементов затруднены. Поэтому у таких образцов анизотропия набухания сохраняется даже при многократном увлажнении и высушивании, а величина  $P_n'$  в нарушенном сложении больше, чем в ненаруженном.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бойков Б. М., Бондаренко В. И. Опыт строительства зданий и сооружений на набухающих грунтах.— В кн.: Новые методы строительства на набухающих грунтах. Волгоград: Н.-Волж. кн. изд-во, 1963, с. 19—30.
2. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки. ГОСТ 24143—80. М.: Изд-во стандартов, 1980. 18 с.
3. Калашников Б. А., Черкасов М. И., Рослова Е. П. Деформации зданий в процессе набухания — усадки грунтов оснований.— В кн.: Строительство на набухающих грунтах. М.: Изд-во ЦНИИС, 1972, с. 128—129.
4. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород/Под ред. Сергеева Е. М. Т. 2. М.: Недра, 1984, с. 289—296.
5. Осипов Ю. Б., Вайтекунене А. И., Лапицкий С. А., Малашенко З. П. Изменение текстуры глинистых грунтов в процессе набухания и усадки.— Инж. геология, 1982, № 5, с. 28—33.
6. Панова К. М. Влияние усадки — набухания на деформируемость хвальинских глин.— В кн.: Строительство на набухающих грунтах. М.: Изд-во ЦНИИС, 1972, с. 64—65.
7. Передельский Л. В. Исследование набухания и усадки глинистых пород в циклах попеременного увлажнения — высыхания.— В кн.: Вопросы исследования лессовых грунтов, оснований и фундаментов. Ростов-на-Дону; Изд-во Ростовск. инж.-стройт. ин-та, 1972, вып. 3, с. 41—45.
8. Рогаткина Ж. Е. Изменение физико-механических свойств некоторых грунтов в результате набухания.— Тр. МИИТ, 1966, вып. 240, с. 23—37.
9. Руководство по лабораторному изучению характеристик набухания и усадки глинистых грунтов. М.: Стройиздат, 1980. 21 с.
10. Сорочак Е. А. Деформация сооружений, возведенных на набухающих грунтах.— Основания, фундаменты и механика грунтов, 1961, № 1, с. 13—19.
11. Schmertmann J. H. Swell sensitivity.— Geotechnique, 1969, v. 19, № 4, p. 530—534.

УДК 624.131

БРИЛИНГ И. А., ЗЛОЧЕВСКАЯ Р. И., ВОЛКОВ Ф. Е.,  
ДИВИСИЛОВА В. И., МАКЕЕВА Т. Г.

## ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ В ГЛИНИСТЫХ ПОРОДАХ

В связи с ростом хозяйственной деятельности человека существенно увеличивается опасность загрязнения геологической среды различными техногенными отходами. В таких условиях задача долгосрочного прогноза распространения вещества-загрязнителя в горных породах приобретает значительную актуальность.

В данной работе рассматриваются вопросы распространения щелочных растворов в глинистых породах в связи с внедрением в практику строительства нового химического способа закрепления дисперсных грунтов путем обработки их растворами щелочи ( $\text{NaOH}$ ) высоких концентраций (2,5—10 н.) [3]. Поскольку процесс миграции щелочных растворов в глинистых породах практически не изучался, в задачу настоящего исследования на первом этапе его разработки входило проанализировать наиболее простой случай возможного распространения этих растворов — в однородной толще водонасыщенных дисперсных пород. Конечная цель изучения — прогнозирование продвижения загрязнения ( $\text{NaOH}$ ) и определение времени снижения концентрации вредных веществ до предельно допустимой концентрации (ПДК), что было достигнуто экспериментально-теоретическими исследованиями и последующей проверкой теоретических результатов на конкретном полевом опыте.

### I. Экспериментально-теоретические исследования

Условия миграции растворов-загрязнений существенно зависят от конкретной геологической обстановки, а именно от проницаемости пород и физико-химических процессов их взаимодействия с жидким веществом. Глинистые породы ограничивают миграцию загрязнений вследствие малой их проницаемости и значительной сорбционной способности, поэтому задача прогноза распространения щелочных растворов в глинистых породах сводится к определению главным образом трех видов параметров: а) фильтрационных, б) диффузионных и в) сорбционных.

#### Определение фильтрационных параметров

Задача определения фильтрационных параметров слабопроницающего пласта при нагнетании в него через инъектор жидкости была теоретически решена Н. Н. Веригиным [2]. При условии нагнетания жидкости в «несовершенную» скважину (т. е. при неограниченной мощности пласта) предполагалось, что вокруг инъектора формируется объемная фигура увлажненной породы в виде цилиндра высотой  $l$  и радиусом растекания  $r_1$  с двумя полушариями на торцах того же радиуса  $r_1$  (рис. 1). Если верхняя часть инъектора примыкает к кровле пласта или нижняя граничит с подстилаемой еще менее проницаемой породой («совершенная» скважина), то одно из полушарий отсутствует.

Полагаем, что при нагнетании в однородную толщу грунта (неограниченной мощности) щелочного раствора образуется область заполняе-

мого щелочью объема грунта вышеуказанной формы. Тогда этот объем грунта  $V_r$  можно вычислить по формуле

$$V_r = \pi r_1^2 l + \frac{4}{3} \pi r_1^3. \quad (1)$$

Следует, однако, учитывать, что за небольшое время нагнетания раствора (3–4 ч) щелочь будет двигаться не по всему внутриворовому пространству, а только по «активной» части сообщающихся пор  $n_a$ , характеризующихся более крупными размерами. При этом объем раствора

$V_{\text{щ}}$ , пошедший на защелачивание грунта, связан с объемом грунта следующим соотношением:

$$V_{\text{щ}} = V_r n_a. \quad (2)$$

В рассматриваемых условиях нагнетания раствора в грунт коэффициент фильтрации ( $K_\Phi$ ) последнего определяется (по Н. Н. Веригину) из выражения

$$q = K_\Phi (4\pi r_1^2 + 2\pi r_1 l) \frac{dH}{dr_0}, \quad (3)$$

Рис. 1. Схематическое изображение объемной фигуры смачивания

где  $q$  — расход раствора;  $H$  — напор в сечении инъектора с радиусом  $r_0$ ; в круглых скобках — сумма поверхностей отдельных частей объемной фигуры защелачиваемой зоны грунта. Решение этого дифференциального уравнения при постоянном напоре имеет вид:

$$K_\Phi = \frac{q}{2\pi l (H + 0,5l)} \ln \frac{2r_1 + lr_1/r_0}{2r_1 + l}. \quad (4)$$

Таким образом, условия эксперимента по определению проницаемости раствора гидроксида натрия, нагнетаемого в грунт, приводятся к расчетной схеме Н. Н. Веригина, а коэффициент фильтрации при этом можно определить, используя формулу (4). Исходя из реальных значений параметров:  $q = 2$  л/мин, или  $3$  м<sup>3</sup>/сут;  $H = 0,7$  атм  $\approx 0,07$  МПа, 7 м водн. ст.,  $r_0 = 0,02$  м,  $l = 1$  м,  $r_1 = 0,6$  м, полученных из данных полевого опыта (см. ниже раздел II), величина  $K_\Phi$  для исследуемого грунта (лесосовидного суглинка) равна  $\sim 0,17$  м/сут. Объем породы  $V_r$ , вместивший закачиваемую щелочь, рассчитанный по формуле (1), составляет  $2,04$  м<sup>3</sup>. Поскольку на закрепление массива при одной заходке инъектора в полевом опыте пошло 600 л щелочи, то, исходя из полученного объема защелачиваемого массива  $V_r$  и реального заполнения объема активных пор грунта щелочью  $V_{\text{щ}}$ , получим значения активной пористости  $n_a$  грунта при фильтрации через него раствора:

$$n_a = \frac{V_{\text{щ}}}{V_r} \cong 0,29, \quad (5)$$

тогда как общая пористость  $n$  закрепляемой породы составляет 0,44. Следовательно, при фильтрации раствора щелочи через водонасыщенный грунт вода, заключенная в объеме пор, составляющих активную пористость (до  $\sim 66\%$  от общего  $n$ ), замещается фильтруемым раствором, остальная же часть пор ( $\sim 34\%$ ) осталась заполненной (как и до закачки щелочи) водой. Дальнейшее взаимодействие раствора с породой, судя по результатам работы [1], будет происходить медленно с постепенным выравниванием концентрации в поровом пространстве за счет главным образом диффузионных процессов.

## Определение диффузионных параметров

Раствор щелочи после его взаимодействия с твердой частью породы и образования вышеописанной защелоченной зоны начинает мигрировать по пласту во все стороны. Обычно в слабопроницаемых водонасыщенных породах горизонтальной составляющей конвективного потока можно пренебречь и отнести движение раствора в горизонтальном направлении целиком за счет процессов молекулярной диффузии. Однако в направлениях вверх и вниз молекулярная диффузия может быть осложнена восходящими и нисходящими потоками, в результате которых сфера миграции раствора может деформироваться. Тем не менее исследование распространения растворов (например, хлористого натрия) из подземных емкостей в толщу водонасыщенных глинистых пород [1] показало, что вертикальная миграция растворов определяется в таких породах только молекулярной диффузией. Учитывая, что эта составляющая может оказаться наиболее опасной при проникновении щелочи в нижележащие водоносные слои и загрязнении вышележащих почвенных горизонтов, следует проводить специальные режимные наблюдения для более точного установления преобладающего направления движения растворов в закрепляемом массиве.

Примем согласно обоснованию в работе [1], что горизонтальная и вертикальная составляющие миграции раствора щелочи в породе определяются молекулярной диффузией, тогда расчет миграции загрязнения из обработанного щелочью объема грунта будет основываться на решении уравнения Фурье (для теплопроводности), аналогичного по структуре уравнению диффузии Фика. А. А. Рошалем [6] было использовано и преобразовано в диффузионную форму уравнение Г. Карлслу и Д. Егера [5], решенное ими для случая распространения тепла из точечного источника во все стороны по сфере (при постоянной температуре источника). Преобразованное расчетное уравнение имеет вид

$$\bar{C} = \frac{r_3}{r} \operatorname{erfc} \frac{r - r_3}{2\sqrt{Dt/n}}, \quad (6)$$

где  $r_3$  — радиус источника загрязнения;  $r$  — расстояние от центра источника;  $D$  — коэффициент молекулярной диффузии;  $t$  — время диффузии,  $\bar{C} = C/C_0$  — относительная концентрация раствора в точке  $r$ ,  $C_0$  — концентрация раствора в источнике;  $C$  — концентрация раствора на расстоянии  $r$  от центра источника;  $\operatorname{erfc}$  — функция, аргумент которой обозначен  $\lambda$  (рис. 2);  $n$  — общая пористость, которая при диффузии вся может считаться активной.

Из уравнения (6) находится время продвижения границы загрязнения на данное расстояние от закрепленной зоны. Для этого подсчитывается функция  $\operatorname{erfc} \lambda$ :

$$\operatorname{erfc} \lambda = \frac{\bar{C}}{r_3/r}. \quad (7)$$

$\lambda$  находят по графику (рис. 2). Поскольку  $(r - r_3)/2\sqrt{Dt/n} = \lambda$ , то  $\sqrt{Dt/n} = (r - r_3)/2\lambda$ . Обозначив  $(r - r_3)/2\lambda = \beta$ , получим  $Dt/n = \beta^2$ , а

$$t = \beta^2 n/D \quad (8)$$

Для расчета продвижения фронта загрязнения примем радиус источника загрязнения  $r_3$  равным радиусу зоны закрепления, считая, что на границе источника поддерживается постоянная концентрация раствора  $C_0$ . Действительно, как показали полевые опыты, при закачке в грунт растворов щелочи 8—10 н. концентрации после окончания процесса закрепления на границе закрепленной зоны, определяемой по существенному приросту прочности ( $\geq 0,1$  МПа) грунта, концентрация раствора

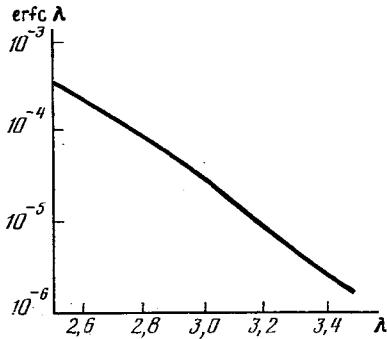


Рис. 2

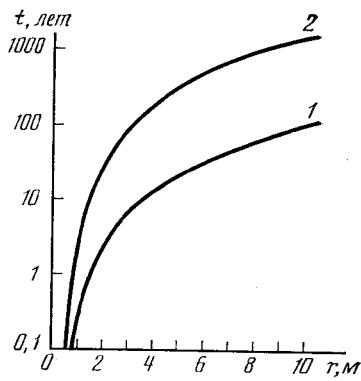


Рис. 3

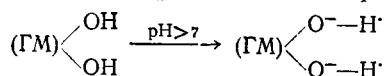
Рис. 2. График функции  $\text{erfc } \lambda$  от  $\lambda$

Рис. 3. Прогноз времени  $t$  диффузационного распространения в грунте фронта загрязнения щелочью (при  $\text{pH}=9$ ) на расстояние  $r$  от границы за-крепленной зоны: 1 — без учета адсорбции; 2 — с учетом адсорбции

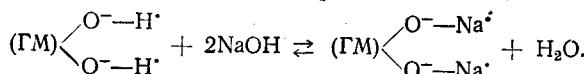
щелочи в порах была близка к 2,0—2,5 н. Примем величину  $C_0$  на границе источника загрязнения равной 2 н., а концентрацию  $C$  на расстоянии  $r$  от источника, или на фронте загрязнения, за  $10^{-5}$  н. (т. е. при  $\text{pH}=9$ ), которая несколько превышает ПДК ( $\text{pH}=8,5$ ); при этом относительная концентрация  $\bar{C}$  составит  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ . Коэффициент молекулярной диффузии раствора щелочи  $D$  в порах грунта положим близким к  $D$  в свободном растворе, т. е. наибольшим из возможных, например,  $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут}$ . Соблюдая последовательность расчетов по формулам (7) и (8), найдем время продвижения фронта загрязнения ( $t_1$ ) без учета сорбции щелочного раствора грунтом. Как показывают результаты расчетов (табл. 1; рис. 3, кривая 1), продвижение фронта загрязнения, содержащего поровый раствор с  $\text{pH} \approx 9$ , существенно замедляется. Так, если на расстояние 1 м от источника фронт загрязнения ( $\text{pH}=9$ ) должен передвинуться через 3 мес, то на расстояние 10 м — более чем через 100 лет.

#### Определение сорбционных параметров

Спецификой взаимодействия глинистых пород с щелочными растворами является аномально высокое поглощение последних поверхностью глинистых частиц. Так, при малых концентрациях растворов щелочи (менее 1 н. или до  $\text{pH} \approx 14$ ) сорбционные явления обусловлены главным образом дополнительной физико-химической обменной адсорбцией ионов  $\text{Na}^+$  на поверхности глин за счет увеличения емкости обмена последних. Как известно [4], в щелочной среде происходит дополнительная диссоциация поверхностных структурных гидроксильов ( $\text{OH}$ ) глинистых минералов ( $\text{GM}$ ), увеличивающаяся с ростом концентрации щелочи, по схеме



с последующим обменом  $\text{H}^+$  на  $\text{Na}^+$  и образованием воды:



При больших концентрациях растворов щелочи ( $> 1$  н.) наряду с указанным процессом происходит частичное (преимущественно поверхностное) растворение кристаллической решетки минералов и образование

Таблица 1

**Результаты расчета миграционных параметров и времени  
продвижения фронта загрязнения ( $\text{pH} = 9$ )**

$r, \text{ м}$	$r_3/r$	егfc $\lambda$	$\lambda$	$\beta$	$\beta^2$	Время продвижения фронта, $t$			
						без учета сорбции, $t_1$		с учетом сорбции, $t_2$	
						сут	лет	сут	лет
0,6	0,83	$6 \cdot 10^{-6}$	3,26	0,0153	$23,7 \cdot 10^{-5}$	3,65	0,01	40	0,11
1,0	0,50	$1 \cdot 10^{-5}$	3,17	0,079	$6,2 \cdot 10^{-3}$	95	0,25	1 050	2,9
2,0	0,25	$2 \cdot 10^{-5}$	3,05	0,246	$6,1 \cdot 10^{-2}$	940	2,6	10 300	28,5
3,0	0,16	$3 \cdot 10^{-5}$	2,98	0,420	0,176	2 700	7,4	30 000	82,0
4,0	0,12	$4 \cdot 10^{-5}$	2,93	0,600	0,360	5 550	15,2	61 000	162,0
5,0	0,10	$5 \cdot 10^{-5}$	2,88	0,780	0,600	9 200	25,0	110 000	300
10,0	0,02	$3 \cdot 10^{-4}$	2,56	1,830	3,350	52 000	142	570 000	1550

из продуктов растворения новых химических соединений типа гидросиликатов, гидроалюмосиликатов и др. Нерастворимая часть этих соединений выпадает в осадок в порах грунта или адсорбируется на твердой поверхности минералов. В этом случае адсорбция ионов щелочи носит преимущественно химический характер и происходит в течение довольно длительного времени.

Из вышесказанного следует, что при расчете миграционных параметров необходимо учитывать активное взаимодействие щелочных растворов с глинистыми породами. С этой целью нами были проведены специальные лабораторные опыты по изучению сорбционных процессов в грунтах при взаимодействии их с растворами щелочи  $\text{NaOH}$  различных концентраций (от 0,01 до 10 н.) в статических условиях. Объектом исследования являлись воздушно-сухие образцы лессовидного суглинка  $dQ_{III}$  нарушенного сложения, отобранные с опытной площадки полигона в г. Уфе, где нами затем были проведены натурные опыты по закачке щелочи в грунт и установлены наблюдения за ее продвижением в массиве (см. ниже).

Изучение сорбционных процессов в лабораторных условиях проводилось в специальных герметически закрывающихся емкостях из органического стекла, куда помещалась навеска грунта  $P$  и заливалась определенным объемом  $V$  раствора щелочи разной концентрации  $C_{\text{исх}}$  в соотношении  $P : V = 2 : 3$ . Через определенные промежутки времени (1, 3, 6 мес) установившийся относительно равновесный раствор щелочи  $C_v$  анализировался методом титрования кислотой по индикатору «метиловому красному». Расчет количества адсорбированного вещества ( $\text{NaOH}$ ) весовой единицей грунта  $C_{\text{тв}}$  производился по формуле

$$C_{\text{тв}} = \frac{(C_{\text{исх}} - C_v)V}{P}. \quad (9)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5. Как видно из графика на рис. 4, поглощение щелочи грунтом растет с увеличением исходной концентрации раствора, достигая максимальных значений на каждом промежутке времени при  $C_{\text{исх}} > 6$  н. С течением времени адсорбция грунтом щелочи увеличивается (рис. 5), причем наиболее существенный относительный рост поглощения ( $\bar{C}_{\text{тв}} = C_{\text{тв}}/C_{\text{тв, исх}}$ ) происходит в растворах щелочи низкой концентрации ( $< 1$  н.). При экстраполяции кривых  $\bar{C}_{\text{тв}}(t)$  в область больших  $t$  получается, что вся щелочь из растворов 0,01, 0,1 и 1 н. концентраций должна полностью поглотиться по прошествии соответственно 3, 8 и 12 мес взаимодействия с грунтом.

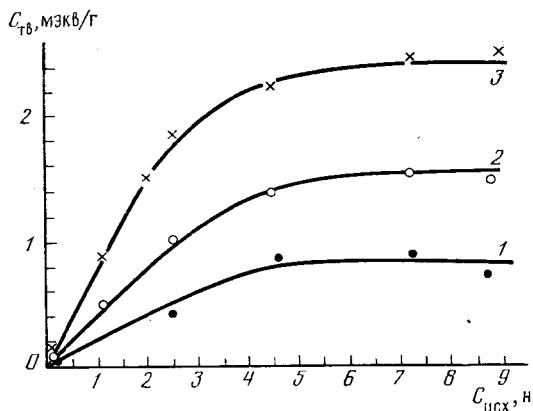


Рис. 4

Рис. 4. Изотермы сорбции щелочи грунтом при различном времени их взаимодействия, мес: 1 — 1; 2 — 3; 3 — 6

Рис. 5. Кинетика поглощения грунтом щелочи из растворов различных концентраций, н: 1 — 0,01; 2 — 0,1; 3 — 1,0; 4 — 2,5; 5 — 4,5; 6 — 9

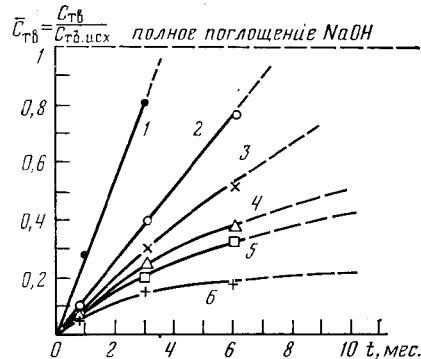


Рис. 5

Следовательно, на фронте движения закачиваемого или диффундирующего в грунт раствора щелочи, где концентрация его за счет процессов разведения и растекания существенно понижена, продвижение его должно значительно тормозиться высокой поглотительной способностью грунта по отношению к щелочным растворам. Активное поглощение щелочи глинистыми породами необходимо учитывать при расчете миграционных параметров. Предполагая, что адсорбционные свойства твердой фазы как бы увеличивают объем пор, в которых происходит миграция щелочи [6], поправку на адсорбцию вводят путем прибавления к значениям пористости —  $n$  (в уравнении (8)) безразмерной величины  $\Gamma$  — константы Генри.  $\Gamma = C_{тв}^*/C_v$ , где  $C_{тв}^* = C_{тв}\Delta$  ( $\Delta$  — объемная масса грунта). Исходя из адсорбционных данных, средние значения  $\Gamma$  через 6 мес взаимодействия грунта и щелочного раствора составляют  $\sim 4,0$ , тогда как  $n \approx 0,4$ . Следовательно, с учетом сорбции время  $t_2$  продвижения фронта загрязнения замедляется примерно на порядок, что отчетливо видно из данных в табл. 1 и на рис. 3. При этом следует иметь в виду, что полученные расчетные данные с учетом сорбции в значительной степени занижены, поскольку при малых концентрациях щелочи величины  $\Gamma$  существенно превышают средние значения. Кроме того, для расчета  $\Gamma$  использовались результаты по адсорбции, полученные через 6 мес после начала взаимодействия грунта и щелочи, когда процесс адсорбции еще был далек от завершения. Тем не менее полученные нами данные (табл. 1 и рис. 3) даже для неоконченного процесса адсорбции и при существенном занижении  $\Gamma$  для  $C_{исх} \leq 1$  н. показывают, что на расстоянии 1 м от закрепленной зоны фронт мигрирующей щелочи с  $pH \approx 9$  может появиться не раньше, чем через 3 года, а на расстоянии 10 м — через полторы тысячи лет. Таким образом, диффузионное продвижение фронта загрязнения щелочью закрепляемого массива существенно локализовано и не может представлять какой-либо опасности загрязнения окружающей среды. Подтверждение этого вывода было получено на специальном проведенном натурном опыте.

## II. Полевые исследования

Натурные эксперименты проводились на двух опытных площадках в г. Уфе, где залегают глинистые породы, различающиеся между собой по генезису и дисперсности.

Одна площадка расположена в пределах первой надпойменной террасы р. Уфы. Геологическое строение ее характеризуется наличием толщи верхнечетвертичных аллювиальных суглинков мощностью 10—15 м, обладающих макропористостью, мягкотекучепластичной консистенцией, включениями органики и карбонатов. Влажность их высокая (0,25—0,30), степень влажности ~1, пористость 41—46%, число пластичности 12. По гранулометрическому составу преобладает крупнопылеватая фракция (до 60%); глинистая фракция (10—20%) представлена монтмориллонитом с гидрослюдой, пылеватая — кварцем, опалом, полевым шпатом и кальцитом. Грунтовые воды залегают на глубине ~2,5 м; pH их 8,2—8,6.

Другая опытная площадка находится на полигоне, расположеннном в северной части г. Уфы на возвышенности с уклоном на СВ. В геологическом строении площадки принимает участие толща верхнечетвертичных делювиальных глин и суглинков мощностью порядка 10—15 м. Они характеризуются тугомягкопластичной консистенцией, повышенной пористостью (50—54%), высокой влажностью (0,33—0,37), преобладанием среднепылеватой фракции (до 40%). Глинистая фракция (до 28%) представлена гидрослюдой и монтмориллонитом; пылеватая содержит те же минералы, что и суглинок на 1-й площадке. Верховодка отмечается на глубине ~1,8 м; pH водной вытяжки — 8,5—8,6.

Нагнетание щелочного раствора 8 н, концентрации (плотностью 1,29 г/см<sup>3</sup>) проводилось через инъекторы со скоростью 2—3 л в 1 мин, при давлении на входе инъектора 0,7—0,8 атм (0,07—0,08 МПа) в течение 4—5 ч. На первой опытной площадке шесть инъекторов были установлены в два ряда на расстоянии 1 м друг от друга и погружались на глубину ~4 м, т. е. ниже уровня грунтовых вод. На второй площадке были забиты четыре инъектора в один ряд также на расстоянии 1 м друг от друга и глубину 3,7 м; защелачивание через них проводилось в два приема.

В обоих случаях за один раз расходовалось 600 л 8 н. щелочи, на закрепление 1 м<sup>3</sup> грунта — 250—300 л. После осуществления работ по защелачиванию грунтов для целей фиксирования уровня грунтовых вод и определения в них содержания щелочи и pH на различных расстояниях  $r_i'$  от инъектора (от 0,6 до 2,5 м) были установлены наблюдательные скважины. Прочность грунта измерялась методом статического зондирования и штамповыми испытаниями.

Как показали результаты полевых опытов, радиус закрепленной зоны  $r_s$  в обоих случаях оказался близким к 0,5 м. Граница зоны эффективного закрепления определялась по опытным точкам испытания грунта зондом, прочность  $\theta$  в которых была более чем в 2 раза выше исходной прочности массива (т. е.  $\geq 1,0$  МПа), причем величины  $\theta$  вдоль радиуса закрепления от инъектора до внешней границы зоны изменялись в широком диапазоне: от 7,0 до 1,0 МПа (т. е. в 2—10 раз). Форма закрепленного массива вокруг одного инъектора в первом приближении напоминает цилиндр, по высоте равный длине перфорированной части инъектора с двумя полусферами на его торцах с радиусом, близким к радиусу закрепленной зоны  $r_s$ . Отличительной особенностью грунта в пределах закрепленной зоны является то, что в течение прошедших после защелачивания 3 лет прочность его практически не изменилась, тогда как концентрация раствора щелочи в нем значительно уменьшилась. Следует также отметить, что в момент определения контуров зоны закрепления массива на ее внешней границе концентрация щелочи в поровом растворе варьировала в интервале 2—2,5 н; зона растекания щелочи после окончания закачки не превышала 0,6 м.

Результаты наблюдений за изменением уровня грунтовых вод и содержанием в них щелочи на определенных расстояниях от закрепленной зоны приведены в табл. 2. Как видно, через 1 год после защелачивания

Таблица 2

**Результаты наблюдений за изменением рН, количеством щелочи  $C_v$  и уровнем грунтовых вод (УГВ) в опытных скважинах**

Опытный участок	Расстояние скважины от закрепленной зоны, м	Характеристика	Время определения характеристик, месяцы				
			1	1,5	3	6	12
1-я площадка (аллювиальный суглинок)	0,2 $r_1 = 0,7$	pH	12,5	12,0	11,3	11,2	10,1
		$C_v$ , г/л	4,8	2,3	0,5	0,42	0,0016
		УГВ, м	2,29	2,05	2,31	1,37	1,90
	$r_1 = 0,7$	pH	12,5	12,1	12,0	11,7	10,5
		$C_v$ , г/л	11,2	4,6	0,87	0,37	0,0024
		УГВ, м	2,36	1,97	2,24	2,39	1,89
	$r_1 = 1,5$	pH	8,64	8,60	8,50	8,32	8,5
		$C_v$ , г/л	0	0	0	0	0
		УГВ, м	2,63	1,97	2,12	1,58	1,92
	$r_1 = 2,5$	pH	8,64	8,50	8,46	8,05	8,21
		$C_v$ , г/л	0	0	0	0	0
		УГВ, м	2,22	1,97	2,22	1,51	1,41
2-я площадка (делювиальная глина)	0,10 $r_1 = 0,6$	pH	8,9	8,44	7,6	—	—
		$C_v$ , г/л	0	0	0	—	—
		УГВ, м	2,95	2,41	1,00	—	—
	$r_1 = 0,75$	pH	7,30	9,3	7,8	—	—
		$C_v$ , г/л	0	0	0	—	—
		УГВ, м	1,69	1,53	1,05	—	—
	$r_1 = 1,15$	pH	7,3	9,1	8,9	—	—
		$C_v$ , г/л	0	0	0	—	—
		УГВ, м	1,69	1,84	1,32	—	—

Примечание:  $C_v$  определялось титрованием кислотой по индикатору «фенолфталеин» (переход при рН 8—9);  $r_1$  — расстояние от инъектора, м.

массива грунта на 1-й площадке на расстоянии от закрепленной зоны 0,2 м содержание щелочи резко снизилось до 0,002 н. ( $\text{pH} \approx 10,5$ ), причем наиболее интенсивное его уменьшение произошло в первые 3—4 мес. На расстоянии свыше 1 м от границы закрепленной зоны за год наблюдений не было обнаружено даже следов щелочи. Что же касается второй площадки, то, хотя вблизи закрепленной зоны на расстоянии от нее 0,25 и 0,65 м (между двумя инъекторами) через 1,5 мес было обнаружено появление небольшого количества щелочи (0,0001 н. и  $\text{pH} \approx 9$ —9,3), однако через 2,5—3 мес pH раствора грунтовых вод установился таким же, каким был до опытных работ. У крайнего же инъектора вблизи зоны закрепления (на 0,1 м) вообще не было обнаружено присутствия щелочи.

Таким образом, экспериментально-теоретические исследования и натурные наблюдения, проведенные в течение нескольких лет показали, что за счет активного взаимодействия щелочных растворов с глинистым грунтом и преобладания медленных диффузационных процессов в течение одного года происходит практически полное поглощение щелочи за пределами очага загрязнения (закрепленной зоны), а концентрация раствора в пределах закрепленной зоны с течением времени приближается к концентрации, близкой к ПДК. Следовательно, закрепление водонасыщенных глинистых грунтов способом защелачивания не представляет опасности загрязнения окружающей среды, поскольку такие грунты являются своеобразным геохимическим барьером для щелочных растворов даже достаточно высоких концентраций ( $\geq 2,0$  н.). Полученные ре-

зультаты позволяют рекомендовать новый химический метод закрепления глинистых и лёссовых грунтов защелачиванием для более широкого внедрения его в практику строительства, особенно в условиях высокого увлажнения указанных грунтов, когда другие методы закрепления оказываются малоэффективны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Брилинг И. А. Характер миграции влаги в водонасыщенных и неводонасыщенных глинистых породах//Влияние поровых вод на физико-механические свойства пород. Киев: Наук. думка. 1974. С. 33—40.
2. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М.: Госстройиздат, 1962. 178 с.
3. Злочевская Р. И., Волков Ф. Е., Воронкевич С. Д., Дивисилова В. И. Закрепление глинистых и лессовых грунтов концентрированными растворами щелочи//Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ. 1983. С. 384—397.
4. Злочевская Р. И., Дивисилова В. И., Куприна Г. А., Сергеев Е. М. Исследование взаимодействия глин с кислыми и щелочными растворами в процессе их набухания//Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1974. С. 4—19.
5. Карлслон Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964, 487 с.
6. Рошаль А. А. Методы определения миграционных параметров. (Гидрогеология и инженерная геология. Обзор ВИЭМС). М.: Изд-во ВИЭМС, 1980. 62 с.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
24.VII.1986

УДК 624.131.1

ЗЕЛИНСКИЙ И. П., ШАТОХИНА Л. Н.

**ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО  
ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Освоение прибрежных территорий северо-западного побережья Черного моря в первую очередь связано с необходимостью проведения противооползневых и берегозащитных мероприятий. Из 360 км протяженности этого побережья на оползневые берега приходится 190 км, на абразионно-обвальные — около 100, на пересыпи и косы — около 70 км. Таким образом, около 300 км побережья требуют выполнения дорогостоящих берегоукрепительных работ, что и предусмотрено в разработанной институтом «Укрюжгипрокоммунстрой» Генеральной схеме противооползневых и берегозащитных мероприятий. Однако до момента осуществления работ, предусмотренных этой схемой (25—30 лет), природная обстановка изменится в результате продолжающегося воздействия природных и техногенных факторов. В связи с этим возникает необходимость создания постоянно действующей модели «Оползни северо-западного побережья Черного моря», способной дать ответ на вопрос о состоянии устойчивости склонов в определенном месте и в интересующий момент времени.

Эта модель, по нашему мнению, должна состоять из трех блоков (частей), выполняющих последовательные принципиально отличные функции: 1) изучить, объяснить (познать) природный процесс; 2) составить алгоритм и осуществить прогноз этого процесса (предвидеть поведение системы); 3) научиться управлять природными процессами, в частности оползнями. Очевидно, что указанные функции связаны между собой не только последовательно, но и обладают обратной связью: научное прогнозирование и научное управление неизбежно приводят к новому объяснению, новому познанию. Однако следует отметить, что прогнозирование и управление возможны лишь при достаточно высоком уровне изученности.

В связи с этим в настоящей работе обращается особое внимание на описание первых двух блоков, условно названных «Природный блок» и «Математический блок». Цель настоящей работы — описать в общих чертах принципы построения природного блока и математическое обеспечение оценки устойчивости склонов (математический блок) с целью прогноза их поведения в зависимости от изменения природных и техногенных факторов. Работа блока управления при условии нормальной работы первых двух, учитывая наличие современных средств моделирования и вычисления, не представляет особого труда, и, по нашему мнению, является специфической областью деятельности, не входящей в круг обязанностей инженерной геологии.

Для характеристики природных условий северо-западного побережья Черного моря были выполнены работы по инженерно-геологическому районированию прибрежных территорий и типизации оползневых склонов. Районирование выполнено с учетом тектонических, геоморфологических (морфологических и морфометрических) и геолого-литологических особенностей побережья, что позволило выделить 52 подрайона, от-

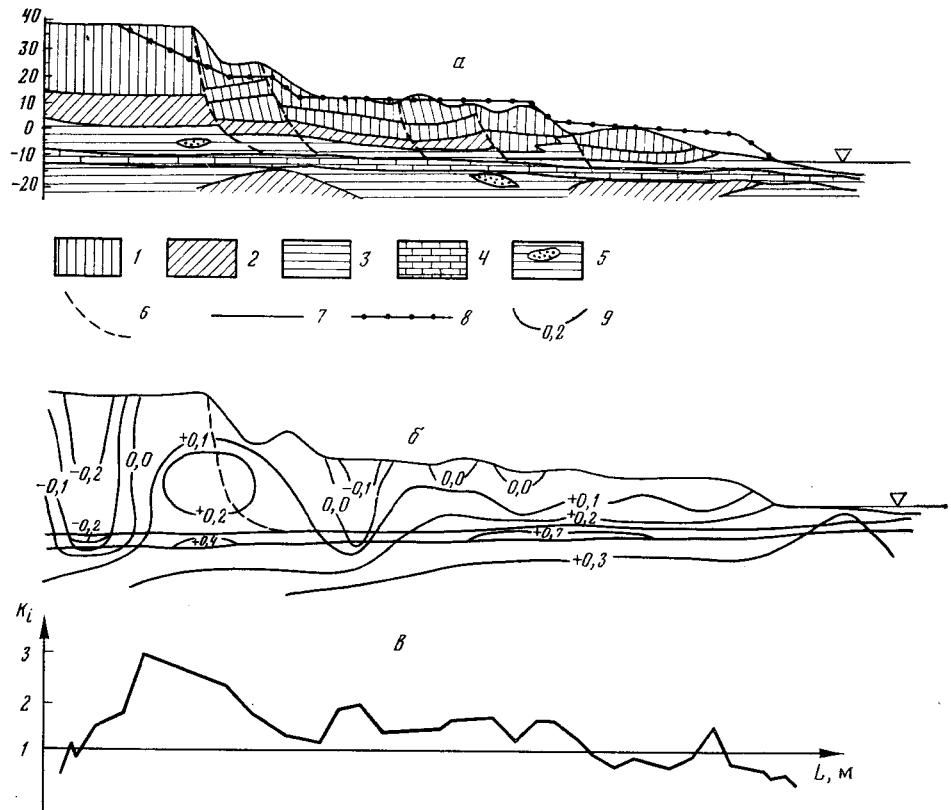


Рис. 1. Оценка устойчивости склона вдоль известной поверхности смещения: *a* — геологический разрез; *b* — распределение горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  МПа; *c* — график значений  $K_i$  вдоль поверхности смещения; 1 — лессовидные суглинки ( $v_d Q_{I-III}$ ); 2 — красно-бурые глины ( $N_2^3$ ); 3 — глины ( $N_2^{2-3}$ ); 4 — известняки понтические ( $N_{1m}$ ); 5 — глины с линзами песков, мэотические ( $N_{1m}$ ); 6 — поверхность оползневого смещения и границы между оползневыми ступенями; 7 — поверхность оползневого склона; 8 — поверхность склона с учетом выполнения противооползневых мероприятий; 9 — изолинии величин горизонтальных напряжений, МПа

личных друг от друга хотя бы по одному из приведенных выше признаков.

В связи с поставленной задачей по оценке устойчивости склонов из всех подрайонов выбраны только те, в пределах которых развиты оползневые процессы, всего — 14. В пределах каждого из них инженерно-геологические условия можно считать неизменными, в связи с чем решение планово-плоской задачи о развитии оползней можно свести к более простой — профильно-плоской. С этой целью по многочисленным данным бурения, инженерно-геологических и гидрогеологических исследований построены 14 типовых инженерно-геологических разрезов, которые существенно отличны друг от друга по принятым классификационным признакам и активности оползнеобразующих факторов и достоверно представляют территории, выделенные в процессе картирования. Дальнейшие работы по изучению природного блока сводятся к составлению таблиц физико-механических свойств грунтов для каждого из типовых разрезов, оценке грунтовых условий и построению схематизированных инженерно-геологических разрезов. На последних выделены пачки однотипных грунтов и слабые прослои. На этом работы по обоснованию природного блока модели можно считать в основном завершенными. Для оценки надежности данных, рекомендованных для обеспечения постоянно действующей модели, необходимы поверочные расчеты. Вообще говоря, к пове-

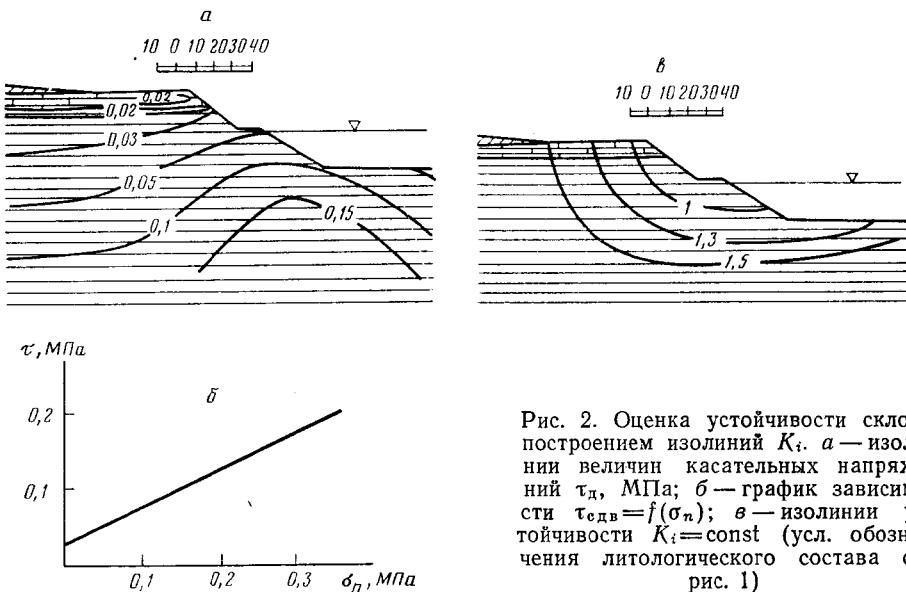


Рис. 2. Оценка устойчивости склона построением изолиний  $K_i$ . а — изолинии величин касательных напряжений  $\tau_d$ , МПа; б — график зависимости  $\tau_{\text{сдв}} = f(\sigma_n)$ ; в — изолинии устойчивости  $K_i = \text{const}$  (усл. обозначения литологического состава см. рис. 1.)

рочным расчетам, прямым и обратным, нужно прибегать каждый раз в случае возникновения сомнений в доброкачественности исходных данных.

Для оценки и прогноза устойчивости оползневых склонов северо-западного побережья Черного моря применительно к типовым инженерно-геологическим разрезам использована методика [1, 2], базирующаяся на сопоставлении полей напряжений и прочности пород и получении полей устойчивости. Для этого предложено пользоваться величиной коэффициента устойчивости, который является модификацией показателя Треска и представляет собой отношение

$$K_i = \frac{\tau_{\text{сдв}}}{\tau_{\max}}, \quad (1)$$

где  $K_i$  — коэффициент устойчивости в определенной точке массива;  $\tau_{\text{сдв}}$ ,  $\tau_{\max}$  — сопротивление грунтов сдвигу и максимальное касательное напряжение в той же точке массива, МПа. В необходимых случаях вместо  $\tau_{\max}$  в расчетах принимается значение действующего касательного напряжения  $\tau_d$ .

Решение поставленной задачи сводится к определению в каждой точке изучаемого массива искомых значений сдвиговых усилий ( $\tau_{\max}$  и  $\tau_d$ ) и сопротивления сдвигу  $\tau_{\text{сдв}}$ , их сопоставлению в соответствии с (1) и получению величин частных значений  $K_i$  и поля этого параметра (поля устойчивости) в целом. Обработка данных может быть выполнена двумя способами: а) построением графика величин  $K_i$  вдоль известной поверхности смещения (рис. 1); б) построением изолиний устойчивости  $K_i = \text{const}$  при отсутствии сведений о положении поверхности смещения (рис. 2).

Для решения задачи об отыскании величин напряжений используются все известные способы, включая методы тензосетки, фотоупругости, ЭГДА. Однако наиболее перспективен в настоящее время метод конечных элементов, реализующийся с помощью ЭВМ. В результате можно получить поля нормальных (в том числе  $\sigma_n$ ) и касательных ( $\tau_{\max}$ ,  $\tau_d$ ,  $\tau_{\text{сдв}}$ ) напряжений.

Прочность пород, сопротивление сдвигу можно получить из условий Кулона — Мора как функцию нормальных напряжений  $\tau_{\text{сдв}} = f(\sigma_n)$ , что

позволяет определить их искомые значения в каждой точке массива, пользуясь графиком, приведенным на рис. 2, б.

В качестве исходной информации задаются характеристики прочности по данным лабораторных испытаний грунтов на сдвиг ( $\tau_{\text{сдв}} = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C$ ), использующиеся для нахождения значений прочности в каждой точке поля нормальных напряжений, которое получено посредством суперпозиции полей горизонтальных  $\sigma_x$ , вертикальных  $\sigma_z$  и касательных напряжений по результатам расчетов и моделирования. Характер распределения  $\sigma_x$  в породах оползневого склона, позволяющий судить о наличии зон растяжения и сжатия, приведен на рис. 1, б.

Следующая операция заключается в сопоставлении полей прочности и действующих (или максимальных) касательных напряжений и формировании нового поля — устойчивости. Его анализ позволяет выделить в массиве зоны с различной степенью запаса устойчивости, оценить общую устойчивость склона или откоса, выявить возможные зоны развития пластических деформаций. В пределах этого поля можно осуществить интерполяцию частных значений  $K_i$  и провести его изолинии, что позволяет: 1) построить график частных значений  $K_i$  вдоль выбранной или известной поверхности смещения (рис. 1); 2) объективно выбрать положение поверхности вероятного оползневого смещения, соответствующее изолинии  $K=1,0$  (рис. 2); 3) оценить общую устойчивость склона вдоль наиболее вероятной поверхности смещения в виде коэффициента или запаса устойчивости; 4) обнаружить в массиве пород склона или откоса зоны потенциальной неустойчивости, где  $K \leq 1$ ; 5) оценить количественно степень влияния различных инженерно-геологических факторов (подрезка и пригрузка, противооползневые мероприятия, снижение прочности пород, гидростатическое и гидродинамическое давления и др.) на общую устойчивость.

Следует отметить, что при наличии чрезмерно больших областей развития пластических деформаций решение исходной задачи в упругой постановке становится неправомерным и требует рассмотрения смешанной упругопластической задачи. Однако при локализации пластических деформаций в небольшой зоне такое решение может быть применено в инженерной практике.

Устойчивость склона вдоль наиболее вероятной или известной поверхности смещения определяется общим соотношением суммарных значений прочности грунтов на сдвиг  $\tau_{\text{сдв}}$  и касательных напряжений  $\tau$ :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{\text{сдв}}}{\sum_{i=1}^n \tau}, \quad (2)$$

где  $K$  — коэффициент устойчивости;  $n$  — количество привлеченных в расчет частных значений  $\tau_{\text{сдв}}$  и  $\tau$ .

График изменения частных значений коэффициента устойчивости, построенный вдоль выделенной в результате изысканий поверхности смещения на одном из типовых участков, показывает, что при общей устойчивости  $K=1,10$  частные значения распределяются неравномерно. Наименьшим запасом устойчивости отличаются участки склона в районе трещины закола, где, по-видимому, началось формирование поверхности смещения. Условия, близкие к состоянию предельного равновесия, отмечены также в средней части потенциальной зоны смещения. В то же время подошва оползневого склона обладает высоким запасом прочности, что обеспечивает устойчивость склона в целом. Дальнейшее снижение устойчивости, как следует из анализа данных рис. 1, будет идти по

пути расширения трещины закола и снижения запаса устойчивости в подошве склона в процессе размыва берегового уступа.

Комплексный анализ полей напряжений, прочности и устойчивости позволяет, кроме того, наметить дополнительные инженерно-геологические исследования, необходимые для окончательного заключения об устойчивости исследуемого массива. Обнаружение зон вероятного разрушения и пластических деформаций (области в массиве пород, где  $K=1$ ) помогает правильно и целенаправленно организовать горные и буровые работы, отбор и испытание образцов, а также наметить мероприятия, направленные на повышение устойчивости склона.

В целом предлагаемая методика позволяет: 1) объективно выбрать положение поверхности вероятного оползневого смещения, определить общую устойчивость склона вдоль этой поверхности, обнаружить зоны потенциальной неустойчивости, оценить роль оползнеобразующих факторов и эффективность противооползневых сооружений в зависимости от изменения природных условий; 2) установить объемы и виды инженерно-геологических исследований в районах развития оползней на стадии проектирования, строительства и эксплуатации противооползневых сооружений.

Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов на опорных участках дают возможность распространить эту информацию на все северо-западное побережье Черного моря, т. е. реализовать работу постоянно действующей модели, направленной на изучение и предотвращение оползней. Более активное использование ЭВМ при имитационном моделировании позволит решить и третью задачу — управление оползневыми процессами на побережье.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зелинский И. П., Максимов С. Н. Об использовании представлений о напряженном состоянии пород склона для оценки его устойчивости//Изв. вузов. Геология и разведка. 1974. № 2. С. 117—121.
2. Зелинский И. П., Гузенко А. В., Черкез Е. А., Бибик О. Л. Моделирование напряженного состояния и устойчивости оползневых склонов//Тр. III Междунар. конгресса по инж. геологии. Т. I. Мадрид, 1978. С. 316—318.

Одесский государственный университет

Поступила в редакцию  
4.III.1986г.

УДК 624.131

ПЛОТНИКОВ И. И.

**УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОРЫВОВ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗОНУ  
СДВИЖЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ БОКСИТОВЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА**

Освоение северо- и южноуральских месторождений бокситов осуществляется в сложных условиях с водопритоком от 7600 м<sup>3</sup>/ч (ЮУБР) до 23000 м<sup>3</sup>/ч (СУБР).

Месторождения разрабатываются подземным способом с обрушением кровли в подзонах локального карста и трещинных систем [1]. В настоящее время глубина очистных работ на СУБР превышает 700 м, а понижение горных разработок достигает 24 м в год. Поэтому дальнейшее развитие рудника связано с освоением глубоких горизонтов. Тенденция углубления фронта горных работ прослеживается и на ЮУБР.

Особенностью гидрогеологических условий освоения глубоких горизонтов бокситов является снижение водопроводимости известняков, подстилающих и покрывающих руду. Здесь в подошве рудных залежей залегают слабооводненные известняки петропавловской (СУБР) и пашийской (ЮУБР) свит. Они перекрываются водоупорными породами, представленными окремненными известняками с глинистыми сланцами верхнеэйфельского возраста  $D_2'$ д (СУБР) и орловских слоев верхнего девона (ЮУБР), которые расчленяют закарстованные толщи на два водоносных горизонта — околорудный и верхний. При этом водопроводимость верхнего водоносного горизонта на 2—3 порядка выше, чем околорудного, а мощность разделяющих их водоупорных отложений изменяется от 40 м на ЮУБР до 250 м на СУБР. На флангах шахтных полей породы водоупора иногда фациально замещаются закарстованными известняками.

При разработке месторождений в верхней части закарстованной толщи в интервале глубин 20—300 м в подзоне взаимосвязанного карста водопроводимости околорудного и верхнего водоносных горизонтов сопоставимы, а темпы понижения глубин проведения горных работ и уровня подземных вод в водоносных горизонтах были одинаковыми.

В подзонах локального карста и трещинных систем скорость опускания очистных работ значительно опережала водопонижение в верхнем водоносном горизонте, что привело к нарастанию гидростатических напоров над очистными выработками до 300 м на СУБР и около 160 м на ЮУБР. При этом на значительном протяжении верхнего водоносного горизонта его подзона взаимосвязанного карста все еще находится в обводненном состоянии.

В результате возникла потенциальная опасность прорывов воды в горные выработки из верхнего водоносного горизонта в случае дезинтеграции водоупорных отложений верхнеэйфельского возраста (или орловских слоев) при формировании зоны сдвижения в толще горных пород. Степень катастрофичности прорывов воды определяется свойствами и состоянием подзоны взаимосвязанного карста водоносных горизонтов и структурными особенностями зоны сдвижения горных пород.

При осущененной подзоне взаимосвязанного карста катастрофичность прорывов воды через зону сдвижения горных пород снижается. Это ил-

**Сведения о размерах подземных карстовых пещер, вскрытых**

№ п./п.	Интервал глубин, м	Количество карстовых пещер	Средняя длина пещер, м $l_{ср}$	Максимальная длина пещер, м $l_{макс}$	Средняя высота пещер, м $H_{ср}$
1	0—400	176	70,6	623,8	3,4
2	100—200	65	26,4	368,2	3,2
3	200—300	21	20,2	328,1	2,8
4	300—400	22	18,7	108,4	2,2
5	400—500	20	16,2	96,3	1,8
6	500—600	11	37,6	320,8	2,4
7	600—700	8	27,4	126,4	2,3
		$\Sigma$ 323	217,1	1972	18,1

люстрируют следующие примеры. В процессе строительства горизонтов —410, —500, —560 (глубина 620—770 м) шахты 14—40-бис при гидростатическом напоре до 180 м, но осущенном состоянии подзоны взаимосвязанного карста все вскрытые горными выработками крупные карстовые системы общим объемом более 10000 м<sup>3</sup>, оказались осушеными. Их дренаж осуществлялся через мелкие трещины при производительности водоотлива 10 м<sup>3</sup>/ч в течение 8—11 месяцев. Уровень подземных вод в рассматриваемом контуре горных работ был снижен за это время на 150—180 м. Аналогичные явления, уменьшающие вероятность возникновения аварийных ситуаций, наблюдаются и на других шахтных полях, где полностью осушена подзона взаимосвязанного карста (шахта 13 Кап., 15 Кап., 16 Кап.). За последние 10 лет там не произошло ни одного прорыва воды, несмотря на вскрытие горными выработками крупных карстовых пещер. Это происходит потому, что запасы воды в локальных карстовых пещерах не возобновляются за счет притока из взаимосвязанного карста, а их емкость на глубине более 300 м ограничена (таблица) и, как правило, успевает опорожниться через системы мелких трещин еще до вскрытия горными выработками.

Однако в том случае, когда над подработанными толщами горных пород расположена неосушенная подзона взаимосвязанного карста, катастрофичность прорывов воды с понижением горных работ нарастает. Моделированием на аналоговой машине УСМ-1 установлено, что при деформации горных пород в процессе формирования зоны сдвижения водоприток в горные выработки из подработанной подзоны взаимосвязанного карста может превысить 13000 м<sup>3</sup>/ч. В этом случае возможность профилактического осушения карстовых пещер через мелкие трещины исключается. Это подтверждается прорывом воды расходом до 12 500 м<sup>3</sup>/ч из карстовой системы сечением около 0,5 м<sup>2</sup>, подработанной горизонтом —70 м шахты «Черемуховская», при гидростатическом напоре над горными выработками около 90 м (СУБР). Очевидно, что при увеличении гидростатического напора над горными выработками, водоприток во время прорывов воды должен нарастиать.

Таким образом, первым условием возникновения опасности катастрофических прорывов воды через зону сдвижения горных пород является наличие в верхнем водоносном горизонте обводненной подзоны взаимосвязанного карста, а вторым — образование разрывных деформаций в водоупорных породах при их сдвигении.

Закономерности формирования зоны сдвижения горных пород на СУБР изучались институтом ВНИМИ на комплексной наблюдательной станции, на участке по простирианию 350 и по падению 300 м, где мощность рудной залежи изменяется от 2 до 8,7 м, а ее угол падения — от

горными выработками Северо-Уральского бокситового рудника

Максимальная высота пещер, м $H_{\max}$	Ширина пещер, м $B_{ср}$	Ширина самой крупной пещеры, м $B_{\max}$	Площадь пещер, м <sup>2</sup> $F_{ср}$	Площадь самой крупной пещеры, м <sup>2</sup> $F_{\max}$	Объем пещер, м <sup>3</sup> $w_{ср}$	Максимальный объем пещер, м <sup>3</sup> $w_{\max}$
4,2	8,2	62,4	578,92	38 630	1966	162 246
4,8	7,4	27,3	195,36	10 046	624	28 220
4,2	7,6	8,2	153,52	2 493	428	6 471
5,4	6,2	6,3	159,4	683	350	3 688
6,6	5,4	5,8	87,48	558	157	1 683
6,3	5,6	5,2	195,52	1 668	470	4 508
5,2	6,2	6,3	169,88	796	390	2 139
36,7	46,6	12,5	1540,08	54 874	4385	208 955

20 до 30°. Пределы прочности перекрывающих руды горных пород изменяются на сжатие от 114 до 194,5 МПа, на разрыв — от 3,2 до 8,5 МПа, на изгиб от 21 до 26 МПа.

Исследованиями установлено, что процесс сдвижения горных пород начинает развиваться при пролетах 60—90 м. При увеличении выработанного пространства до 180×180 м сдвижение достигает земной поверхности. Зона сдвижения состоит из трех подзон: беспорядочного обрушения, трещинных структур и прогиба без разрыва сплошности пластов.

При этом максимальное увеличение проницаемости горных пород в 100 и более раз происходит в подзоне беспорядочного обрушения, где коэффициент разрыхления превышает 1,2. В подзонах трещинных структур и прогиба пластов изменений проницаемости пород не установлено. Высота распространения подзоны обрушения ( $h$ ) по данным глубинных реперов не превышала трехкратной вынутой мощности боксита ( $m$ ). Однако процесс формирования зоны сдвижения протекает неравномерно. Например, в Прокопьевско-Кизеловском районе Кузнецкого угольного бассейна мощность подзоны беспорядочного обрушения в трех случаях из 800 значительно превзошла ее среднюю величину [2]. В Кизеловском бассейне по данным бурения 22 скважин мощность подзоны обрушения не превзошла двухкратной мощности пласта, а по двум скважинам превысила четырехкратную [2]. Поэтому, учитывая значительные вариации высоты подзоны беспорядочного обрушения горных пород для обеспечения достоверности прогнозирования возможности прорыва воды и надежности мероприятий по созданию безопасных условий горных работ, исследования зоны сдвижения были проведены в пределах всей подработанной толщи Черемуховского месторождения бокситов (СУБР).

Фильтрационные свойства водоупорных пород ( $D_2, D_1$ ) в естественном состоянии и в зоне сдвижения изучали опробованием гидрогеологическими и геофизическими методами многоствольных скважин, вскрывших водоупор в интервале глубин от 100 до 550 м. При изучении физических свойств водоупора в естественном состоянии скважины располагали за пределами зоны сдвижения горных пород. В зоне сдвижения многоствольные скважины размещали по простиланию месторождения в пределах полосы шириной около 600 и длиной 3200 м, в контурах с повышенными мощностями рудной залежи (от 5 до 19 м). В процессе исследований было пробурено и опробовано нагнетаниями и наливами в комплексе с расходометрией 22 многоствольные скважины, которыми была пересечена зона сдвижения пород в 136 интервалах. В качестве основных гидрогеологических параметров использовали удельные дебиты ( $q=Q/H$ ) и коэффициенты фильтрации ( $K$ ) трещинных систем.

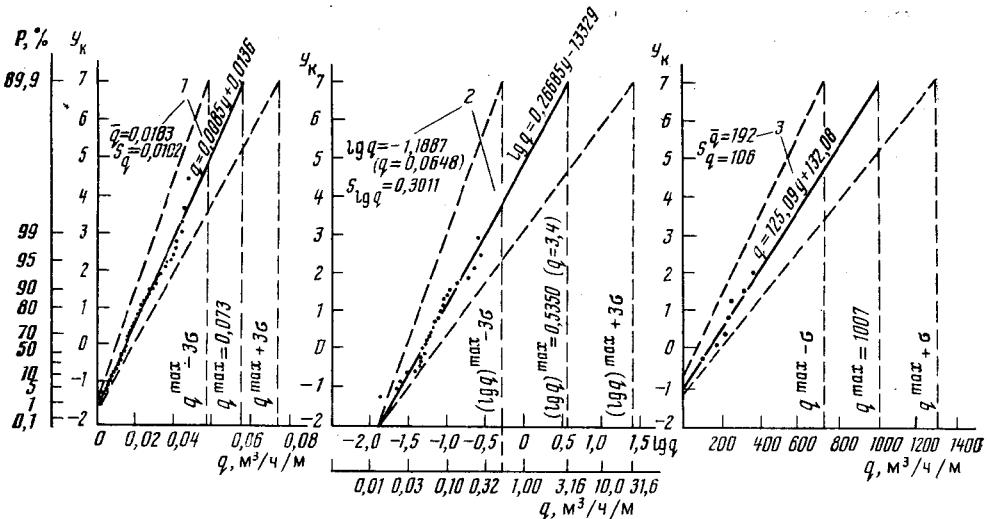


Рис. 1. Распределение максимальных значений удельных дебитов скважин, вскрывших водоупорные породы. 1 — до подработки водоупора горными выработками; 2 — после подработки водоупора (подзона трещинных структур); 3 — после подработки водоупора (подзона беспорядочного обрушения)  $P=e^{-e^{-y}}$  шкала распределения вероятностей максимальных членов вариационного ряда,  $Y_K$  — шкала распределения нормированных отклонений от моды,  $S$  — среднее квадратическое отклонение,  $\sigma$  — средние стандартные ошибки

В процессе анализа гидрогеологических параметров водоупора в естественном состоянии установлена однородность статистических выборок, а их распределение согласуется с логарифмически-нормальным законом. Корреляционным анализом отвергаются предположения о наличии зависимости значений  $q$  и  $K$  от глубины, мощности и физико-механических свойств водоупорных пород.

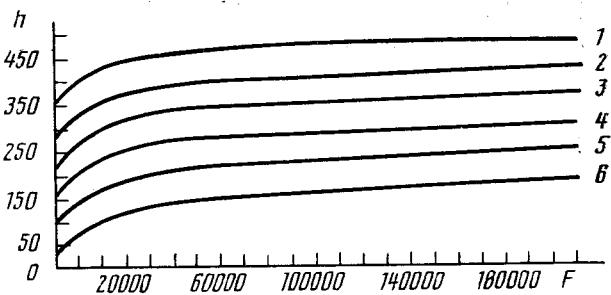
На основе теории распределения экстремальных величин [3] установлено, что фоновые значения гидрогеологических параметров составляют  $K_{\Phi, \text{ср}}=0,061 \text{ м/сут}$ ,  $q=0,0183 \text{ м}^3/\text{ч}/\text{м}$ , максимальные —  $K_{\Phi}=0,0790 \text{ м/сут}$ ,  $q=0,0732 \text{ м}^3/\text{ч}/\text{м}$ . Коэффициенты водопроводимости водоупорных пород не превышают  $15 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

Проницаемость зоны сдвижения горного массива неоднородна. В подзоне прогиба пластов фильтрационные свойства не изменились. В подзоне трещинных структур фоновые удельные дебиты увеличились в 3 раза (с  $0,0183$  до  $0,0648 \text{ м}^3/\text{ч}/\text{м}$ ), а коэффициенты фильтрации — в 2 раза. При этом максимальные значения удельных дебитов увеличились в 40 раз (с  $0,073$  до  $3,428$ ), что свидетельствует о возросшей фильтрационной неоднородности горных пород (рис. 1).

Подзона беспорядочного обрушения горных пород диагностируется при бурении скважин полным поглощением промывочной жидкости. Ее верхняя граница обычно проходит ниже водоупорных отложений. При отработанной площади менее  $400 \text{ м}^2$  и мощности руды до 3 м подзона обрушения обычно отсутствует. В 32% случаев подзона беспорядочного обрушения не сформировалась и при мощности боксита 4—5 м. Зависание кровли над отработанным пространством обнаружено скважинами через 38 месяцев после отработки рудной залежи. Сейсмической станцией «Североуральск» фиксируются подвижки горных пород на площади, отработанной в последние 2—8 лет. Следовательно, формирование подзоны беспорядочного обрушения происходит в течение длительного времени.

В 65% случаев высота подзоны беспорядочного обрушения не превышает трех мощностей извлеченного боксита, в шести случаях подзо-

Рис. 2. Номограмма для оценки высоты зоны сдвижения на Черемуховском месторождении бокситов.  $h$  — высота зоны сдвижения в м:  $h = 236,4 + 12,26 \cdot M + 68,4656 \lg F$  ( $R = 0,78$ )  $F$  — площадь оруденения в  $m^2$ ;  $M$  — максимальная мощность рудной залежи в исследуемом блоке в м: 1=30; 2=25; 3=20; 4=15; 5=10; 6=5



на обрушения распространилась на водоупор, и только в двух случаях, при мощности рудной залежи более 6 м и площади извлеченной руды более 6000  $m^2$ , полное поглощение промывочной жидкости произошло за пределами 12-кратной мощности боксита. Средние удельные дебиты вновь образованной в водоупоре фильтрационной среды превысили 100  $m^3/\text{ч}/\text{м}$ , а их максимальные значения достигли 1000  $m^3/\text{ч}/\text{м}$  (рис. 1). Это доказывает возможность образования в водоупоре трещинных структур с совершенной гидравлической связью между карстовыми системами верхнего водоносного горизонта и горными выработками шахты.

Корреляционным анализом установлено, что высота подзоны обрушения горных пород ( $h$ ) определяется мощностью извлеченной руды ( $M$ ) и площадью сплошной подработки кровли выработок ( $F$ ). Эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется уравнением регрессии (рис. 2).  $h = -236,40 - 12,6M + 68,46F$ ,  $r = 0,78$ . При использовании полученного уравнения для прогнозирования гидрогеологических условий отработки глубоких горизонтов Черемуховского месторождения бокситов оказалось, что полная дезинтеграция водоупорных пород может произойти при отработке 12 подсчетных блоков из 76. Расчетный максимальный водоприток в горные выработки при неосущенном состоянии подзоны взаимосвязанного карста верхнего водоносного горизонта может достичь 28 000  $m^3/\text{ч}$ , а на участках фациального выклинивания водоупорных пород превысить 30 000  $m^3/\text{ч}$ . В случае организации профилактического осушения подзоны взаимосвязанного карста верхнего водоносного горизонта, что может быть обеспечено при водонаполнении до 300 м на северном фланге Черемуховского месторождения, максимальный водоприток суточной продолжительности через подработанную толщу водоупора не превысит производительности водоотливных средств шахты ( $\approx 3500 m^3/\text{ч}$ ). Гидродинамическими расчетами установлено, что в условиях уменьшения с глубиной объема карстовых систем, аккумулирующих статические запасы подземных вод (таблица) при отсутствии источников их восполнения и средней водопроводимости водоупора 8  $m^2/\text{сут}$ , произойдет самопроизвольное осушение (около 90%) карстовых пещер еще до подработки водоупора горными выработками.

Таким образом, основным мероприятием по предотвращению прорывов карстовых вод из верхнего водоносного горизонта является профилактическое осушение в последнем подзоне взаимосвязанного карста. Аналогичные прогнозные оценки и рекомендации актуальны для Ново-кальинского (СУБР) и Алексеевского (ЮУБР) месторождений бокситов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Плотников И. И. Гидрогеологические проблемы разработки бокситовых месторождений Урала. — Сов. геология, 1985, № 3, с. 113—121.
- Сдвижение горных пород в земной поверхности. М.: Углехимиздат, 1958. 276 с.
- Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Изд. 2-е. М.: Наука, 1965. 511 с.

УДК 624.131

ОСИПОВ Ю. Б., БУЧКИН М. Н., АРОНЗОН М. Э.

**ТИПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ УРАЛА**

Современный уровень потребностей промышленности и сельского хозяйства страны в минерально-сырьевых ресурсах порождает прогрессирующую тенденцию расширения поисков, разведки и эксплуатации недр в неблагоприятных инженерно-геологических условиях. В наиболее негативных формах эта тенденция выражена для ряда известных рудных районов и угольных бассейнов с исторически сложившейся горнодобывающей промышленностью. К ним относится Урал — крупнейший горнодобывающий регион страны, где в последние десятилетия активно проводятся исследования по выявлению перспективных рудоносных площадей и изучение глубоких горизонтов старых районов.

Экономические перспективы новых горнорудных районов обеспечиваются планомерной подготовкой запасов, находящихся в недрах. В связи с этим геологоразведочные работы уже на ранних стадиях должны быть обеспечены региональной инженерно-геологической информацией, позволяющей правильно планировать крупномасштабные исследования, получать объективные оценки сложности условий будущей разработки, предвидеть негативные процессы, связанные с горнодобывающей деятельностью, планировать мероприятия по охране и рациональному использованию геологической среды.

Многолетние исследования на Урале показали, что необходимую информацию в условиях горнодобывающего региона можно получить не прибегая к дорогостоящим исследованиям регионального характера, а экстраполируя оценки условий разработки известных месторождений (групп месторождений, районов) на малоизученные территории, основываясь на принципе геологических аналогий, регионально-геологических закономерностях размещения полезных ископаемых и специальном инженерно-геологическом картировании. Таким образом, одной из задач, органически связанной с проблемой развития горнодобывающей промышленности в крупном горнодобывающем регионе, является изучение, оценка и прогноз региональных инженерно-геологических условий разведенных и разрабатываемых месторождений полезных ископаемых.

Цель данной работы — разработка и реализация методики регионального прогноза инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых Урала. В связи с этим были поставлены и решены следующие основные задачи: а) выполнен анализ природных условий размещения и разработки важнейших полезных ископаемых горнокладчатого Урала; б) разработан и реализован метод инженерно-геологической типизации горнодобывающих районов; в) разработан верифицируемый алгоритм прогноза, позволяющий экстраполировать результаты инженерно-геологической типизации на территорию региона; г) согласно разработанной методики составлена карта районирования Урала по инженерно-геологическим условиям разработки полезных ископаемых  $M = 1 : 1'000\,000$ .

Горнодобывающая промышленность Урала сосредоточена в границах нескольких десятков ведущих горнорудных районов и угольных бассей-

нов, которые обеспечивают промышленный потенциал этого крупного экономического региона страны. Именно в их пределах проводились планомерные инженерно-геологические исследования на Урале, начиная с середины 60-х годов. К настоящему времени имеются достаточно полные представления об инженерной геологии месторождений многих угольных бассейнов и рудных районов: Кизеловского, СУБРа, Ивдельского и мн. др.

В ЦИГГЭ ПГО Центргеология выполнено обобщение результатов исследований 40 горнорудных районов в виде справочно-информационного фонда «Инженерная геология месторождений Урала», куда вошли сведения об инженерно-геологических и гидрогеологических условиях разрабатываемых и разведуемых месторождений угля, железа, меди, полиметаллов, бокситов и других важнейших полезных ископаемых. Наиболее приемлемой формой обобщения и систематизированного изложения этой информации является типизация и специальное инженерно-геологическое районирование территории горнодобывающего региона. Районирование крупного (более 0,5 млн. км<sup>2</sup>) региона по инженерно-геологическим условиям разработки полезных ископаемых — методически сложная задача, по существу не имеющая аналогов в отечественной и зарубежной литературе. В результате анализа работ по методологии районирования и прогноза [1, 6, 9, 10, 13] установлено, что ее решение в принципе основывается на выполнении нескольких элементарных логических операций с объектами — группирования, деления, классификации и расчленения. Трем последним соответствует современный математический аппарат. Комплексирование его отдельных идей и алгоритмов позволяет решать многие методически сложные задачи инженерной геологии. Достижение поставленных целей оказалось возможным благодаря разработке методики, которая названа «типологическим прогнозом». Под таким прогнозом понимается опережающее отражение условий строительства и (или) их изменений, основанное на пространственном переносе на объект прогноза существенных показателей типологически определенных объектов. Этим определением подчеркивается, что осуществление априорной инженерно-геологической типизации условий разработки Урала определяет содержание прогноза, а также способ составления карты районирования Урала.

В методическом плане районирование крупного горнодобывающего региона, основанное на пространственной экстраполяции априорной схемы, представляет собой совокупность действий, использующих метод аналогий, логико-математические методы классификации (таксономии) и прогноза (распознавания образов). В данном случае типологический прогноз подразумевает наличие инженерно-геологической типизации горнодобывающих районов, которые приняты в качестве типологических единиц и считаются квазиоднородными в рамках поставленной задачи и масштаба составляемой карты районирования.

Подавляющее число работ в области инженерно-геологической классификации месторождений ориентировано на оценку разведуемых месторождений, и поэтому их результаты мало применимы к таким сложным объектам, как горнодобывающие районы.

Нами использованы представления о том, что разрабатываемые месторождения являются природно-техническими системами со множеством элементов, связанных между собой непостоянными отношениями. Принципиально возможно исследовать и типизировать в рамках терминального подхода разрабатываемые месторождения (горнодобывающие районы) как геодинамические системы на основании анализа процессов и явлений, сопровождающих горные работы.

Во время многолетних наблюдений в рудниках различных районов Урала было отмечено [2—4], что разработка того или иного полезного ископаемого сопровождается строго определенным набором горно-геоло-

тических процессов или ассоциацией процессов. Вид ассоциации зависит от способа разработки, геологических условий залегания полезного ископаемого, климата и других природных факторов, объединяемых в понятие «инженерно-геологические условия разработки». Систематический анализ материалов изучения процессов по нескольким десяткам месторождений угля, меди, железа, бокситов и других полезных ископаемых подтвердил сделанные наблюдения и показал, что при известных ограничениях закономерные ассоциации процессов можно рассматривать как реакции геологической среды на горные работы, т. е. техногенное воздействие. Исходя из этого, задачу анализа условий и классификации месторождений можно подменить задачей анализа и классификации ассоциаций процессов (явлений), характерных для изучаемых месторождений. Однако на этом пути имеются серьезные трудности, связанные с тем, что горно-геологические процессы характеризуются большим разнообразием порождающих их причин. В целях парагенетического анализа и классификации процессов была использована идея вещественно-энергетической редукции. Ее суть сводится к тому, что компонентами геологических процессов являются относительно элементарные вещественно-энергетические взаимодействия (термодинамические, термохимические, механические и др.) [1, 5, 7]. Число их в принципе ограничено. Тогда отдельно взятый процесс (явление) легко представить в виде строго определенной композиции элементарных взаимодействий или подпроцессов.

Необходимость обобщения многочисленных фактических данных о процессах в выработках предопределила статистический подход к задаче инженерно-геологической типизации. Для этого был использован формальный аналог понятия «парагенезис горно-геологических процессов»:

$$E_n^l \rightleftharpoons E_{n-1}^{l, \dots, m, r} S_n,$$

где  $n=1$  — уровень подпроцессов, являющихся элементарными по отношению к процессу уровня  $n$ ;  $l, \dots, r$  — множество видов подпроцессов уровня  $n=1$ ;  $S_n$  — структура парагенезиса, т. е. множество таксономических отношений между подпроцессами уровня  $n=1$ . Конструктивное использование модели парагенезиса оказалось возможным при наличии таксономии, позволяющей ввести некоторые формальные отношения между процессами. Для этого потребовалось представить физически различные горно-геологические процессы и явления (самовозгорание углей и руд, оползни, набухание глин, выбросы газов и др.) в некоторой единой системе — специально построенной классификации вещественно-энергетических взаимодействий.

Известно, что в горно-геологических системах горные породы, подземные и поверхностные воды, подземные газы и рудничная атмосфера являются теми компонентами горно-геологических систем, от наличия взаимоотношений, свойств и состояния которых в огромной степени зависит собственно возможность реализации и характер вещественно-энергетических взаимодействий.

Разработанная классификация видов геовещественно-энергетических взаимодействий имеет вид решетки. В качестве основания деления использованы два признака: 1) вид вещественно-энергетического взаимодействия (теплофизическое, термодинамическое, электродинамическое, электрохимическое, физико-химическое, термохимическое, гравитационное, гравидинамическое, упругодинамическое, механическое); 2) геосфера — источник вещественно-энергетических ресурсов (литосфера, подземная и поверхностная гидросфера, подземные газы и атмосфера). Элементы классификационной таблицы имеют сплошную нумерацию от 1 до 50, и каждый процесс закодирован в двоичной системе. Любой процесс, реализующийся в поле взаимодействия в системе выработка — гес-

логическая среда, можно представить как парагенетическую ассоциацию элементарных вещественно-энергетических взаимодействий. Предложенный подход позволил составить «Словарь процессов», включающий 70 разновидностей.

Таксономическую структуру любого явления можно представить в виде матрицы сопряженности видов взаимодействий ( $50 \times 50$ ), в которой взаимосвязи элементов геовещественно-энергетического парагенезиса обозначаются единицами, а их отсутствие — нулями. Статистический анализ результатов изучения разных процессов, реализующихся при разработке месторождений горнодобывающего района, сводится к сложению этих матриц. Интерпретация выявленной таким образом реакции геологической среды на горные работы основывается на факторной модели парагенетического метода:

$$F = F_L + F_s + F_e,$$

где  $F_L$  — факторы регионального характера (общность);  $F_s$  — факторы, зависящие от способа разработки и вида полезного ископаемого (специфичность);  $F_e$  — факторы, обусловленные особенностями горных работ и ошибками метода (случайность). Сравнительно простая методика анализа обобщенных матриц позволяет установить парагенетические ассоциации горно-геологических процессов, характерных для того или иного горнодобывающего района. Она основана на сравнении тесноты связи между элементами (взаимодействиями), общими для двух процессов (внешние связи), с теснотой связи между элементами (взаимодействиями) одного процесса (внутренние связи). Использование этой методики позволило установить основные парагенетические ассоциации процессов, реализующихся при открытых и подземных горных работах большинства горнодобывающих районов Урала.

Выявление факторов и парагенетических ассоциаций определило принципиальную возможность инженерно-геологической типизации ведущих горнодобывающих районов Урала, в том числе был использован критерий таксономической близости двух процессов (ассоциаций процессов):

$$Q(A_i, A_j) = \frac{q_T}{q_i + q_j - q_T},$$

где  $q_i$ ,  $q_j$  — количество парагенетических связей в структурных матрицах для районов  $A_i$  и  $A_j$ ;  $q_T$  — число совпадающих парагенетических связей для  $A_i$  и  $A_j$ .

Если два горнодобывающих района совпадали по широкой ассоциации геовещественно-энергетических взаимодействий, отвечающей их сходству в смысле ( $F_L + F_s$ ), они объединялись в один тип инженерно-геологических условий, который соответствует инженерно-геологическому району на карте районирования; соответственно таксономическое сходство горнодобывающих районов только по  $F_L$  позволяло их объединить в группу типов — таксономической единице, соответствующей инженерно-геологическому региону II порядка.

Таким образом, была получена типологическая схема Урала, основанная на результатах анализа процессов, сопровождающих разработку полезных ископаемых. Она включает 39 типов инженерно-геологических условий, объединенных в 17 групп.

Для решения задачи типологической экстраполяции использовались идеи, разработанные в математической теории распознавания образов. Суть излагаемого метода типологического прогнозирования сводится к решению многоальтернативной классификационной задачи: следует установить, к какому из 39 известных типов инженерно-геологических усло-

вий разработки полезных ископаемых Урала принадлежит участок региона размером  $25 \times 25$  км, который принят в качестве элементарного объекта прогноза. В границах горноскладчатого Урала таких участков, соответствующих размеру рудного поля содержится 850. Из них около 20% попадают в контуры горнодобывающих районов. Последние представляют совокупность объектов с известной классификацией или, в терминологии теории распознавания, обучающую выборку. В том случае, когда на основании распознавания состояния объекта с некоторой вероятностью предсказывается его поведение (процессы, тип условий и т. д.), классификация приобретает смысл прогноза. Решение подобной задачи с использованием ЭВМ называется автоматизированным прогнозированием по принципу прямых аналогий.

Предварительным этапом в ее решении является анализ региональных карт Урала с целью выбора исходных переменных для описания всех участков, попадающих в контур региона. В перечень переменных вошли структурно-тектонические, литоформационные, гидрогеологические, климатические, геоморфологические и другие региональные признаки, отобранные, исходя из цели прогноза, изученности региона и наличия соответствующей информации. Каждый участок был описан в среднем 50 (30—80) признаками, которые являются косвенными относительно основания деления, использованного при составлении априорной классификации.

Типологический прогноз выполнен на геологической основе масштаба 1 : 1 000 000 с использованием разработанного алгоритма, который отражает особенности и условия инженерно-геологического прогнозирования, характер и ограничения, накладываемые исходной информацией.

Введем некоторые формальные обозначения. Подмножество элементарных участков  $p, r, \dots, t$ , попадающих в контур горнодобывающего района  $A(B, C, \dots, W)$ , будем называть классом в априорной классификации  $K$ . Заметим, что  $A=1, B=2, \dots, W=39$  означает наличие соответствующих эталонных выборок, характеризующих различные условия разработки полезных ископаемых на Урале. Объем этих выборок зависит от размеров районов и обозначается через  $N_A, N_B, \dots, N_W$ . При этом обучающие выборки  $A(B, C, \dots, W)$  должны быть описаны максимальным набором  $M$  признаков  $i, j, \dots, n$ , которые образуют так называемое пространство описания  $\Omega$ . Любой элементарный участок, не вошедший в  $A(B, C, \dots, W)$ , представляет собой объект прогноза  $X$  и описывается некоторым поднабором  $m \subset M$ .

Сущность разработанного и использованного в работе алгоритма прогноза заключается в оценке евклидовых расстояний  $r_A, r_B, \dots, r_W$  элементарного участка  $X$  до всех известных горнодобывающих районов, вошедших в классификацию  $K$ . Подразумевается, что количественные операции производятся с некоторыми отображениями (образами)  $X$  и  $A, B, \dots, W$  в пространстве существенных признаков  $\Omega$ .

Основная идея моделирования многомерных объектов базируется на системной концепции А. И. Уёмова [12] в интерпретации авторов. Она состоит в следующем. Для множества таксономически однородных геологических объектов существует некоторое отношение  $R$ , выделяющее из описания  $\Omega$  подмножество  $m$  признаков описания ( $m \subset M$ ), удовлетворяющих концепту  $P$  (например, цели отбора объектов в класс, пониманию типа системы и т. д.). Это отношение называется системообразующим или организацией описания. Здесь под описанием геологического объекта понимается набор признаков, выраженных в числовой форме. Структурой описания является множество разностных отношений между  $M$  признаками, представляющими конкретное описание объекта. Это множество задается в виде таблицы отношений  $T$ .

Число нормированных отношений, которыми задается таким образом объект  $X$ , равно  $1/2(m^2 - m)$ . Распознаваемый объект каждый раз норми-

руется в терминах класса, с которым осуществляется сравнение. Суть оценки  $R_{\Omega}^A$  заключается в построении таблиц  $R_{\Omega}^A T$  размером  $m \times m$ , элементами которых являются веса (устойчивость) отношений признаков в классе  $A$  ( $B, C, \dots, W$ ). Заметим,  $R_{\Omega}^A \neq R_{\Omega}^B \neq \dots \neq R_{\Omega}^W$ , что установлено для всех горнодобывающих районов Урала и является принципиальным результатом анализа. Это свидетельствует о том, что внутригрупповая информативность признаков описания непостоянна и меняется при переходе из класса в класс. В алгоритме предусмотрены и другие операции: оценка классификационной (межгрупповой) значимости признаков, оценка весов (типичности) объектов  $t_p^A$ , входящих в обучающие совокупности (классы), оценка весов (的独特性) классов  $t_A^*$ , оценка качества решающего правила, позволяющая контролировать процесс распознавания.

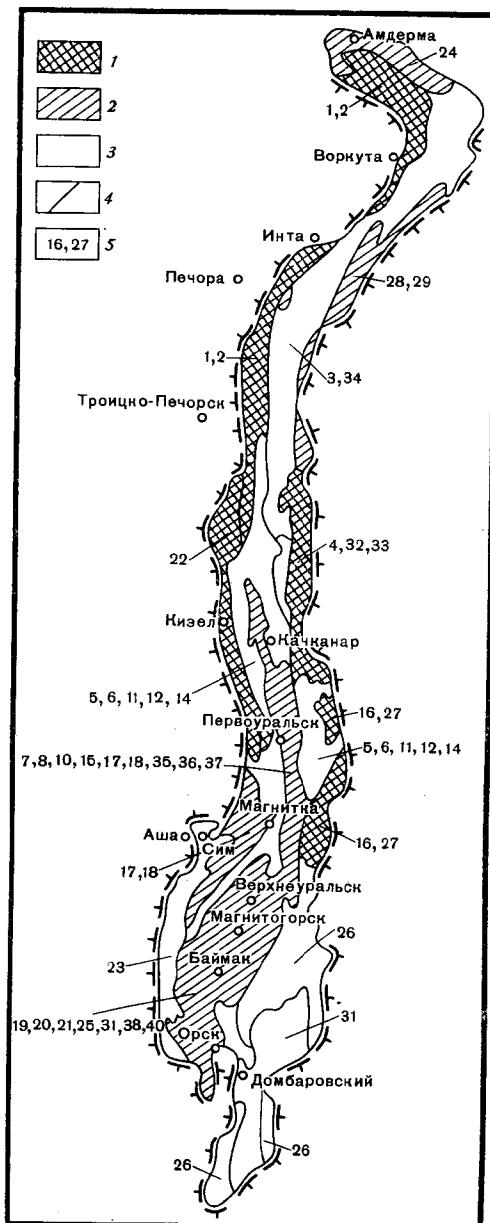
Распознаваемый объект  $X$  сравнивается не с формальным средним в классе, а с каждым объектом, входящим в класс. Параметры алгоритма позволяют улучшать решающее правило в процессе его адаптации к исходному эмпирическому материалу. Проверка работы алгоритма на «экзаменационной» совокупности объектов ( $N=39$ ) с известной типологией показала его высокую надежность ( $p^*=0,92$ ).

Уравнение прогноза, выражающее оценку расстояния  $X$  до класса  $A$  ( $B, C, \dots, W$ ), записывается в виде:

$$\rho_X^A = t_A^* \sum_{p=1}^{p=N_A} (aT_p^A - XT)^2 R_{\Omega}^A T \times t_p^A,$$

где  $aT_p^A$  — структура описания  $p$ -го объекта из класса  $A$ .

На печать выдаются значения  $\rho_X^A, \rho_X^B, \dots, \rho_X^W$  и по наименьшему значению из этого множества определяется принадлежность прогнозируемого участка к одному из типов условий. Номер «типа условий» указывается на карте региона или же опознанный участок раскрашивается соответствующим цветом. Таким образом, на геологической основе составляется легко читаемая мозаичная карта прогноза. Поиск и корреляция гра-



Схематизированная карта прогноза инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых Урала: 1 — преимущественно весьма сложные инженерно-геологические условия, 2 — сложные, 3 — преимущественно простые; 4 — границы инженерно-геологических регионов II порядка, 5 — номера инженерно-геологических районов (типов условий) в регионе II порядка

ниц инженерно-геологических районов при этом не представляют принципиальных трудностей.

Окончательное принятие решения обосновывается формальными оценками вероятностного типа, так как региональный прогноз осуществляется в условиях высокой неопределенности. Встречаются ситуации, не похожие ни на одну из ситуаций, представленных в априорной классификации. Поэтому для каждого опознанного участка ЭВМ вычисляет меру относительной достоверности прогноза в принятой типологии. Она измеряется как доля «вклада» опознанного типа условий в прогнозируемом объекте  $X$ .

Использованная методика позволила осуществить достоверный (с вероятностью более 0,51) типологический прогноз для 81% территории Урала. Отмечается хорошая сходимость результатов инженерно-геологического прогноза с результатами металлогенических исследований.

Составленная карта прогноза инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых Урала масштаба 1 : 1 000 000 (рисунок) содержит региональную прогнозную оценку сложности инженерно-геологических условий разработки по Г. Г. Скворцову [8], обобщенные характеристики типов условий, разрезы характерных рудоконтролирующих структур районов, а также прогноз парагенетических ассоциаций горно-геологических процессов, реализация которых возможна при разработке месторождений региона.

## Выводы

1. На основе разработанной методики типологической экстраполяции впервые составлена карта прогноза инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых Урала, в которой обобщен опыт разработки и эксплуатации месторождений основных горнодобывающих центров этого региона.

В соответствии с полученными прогнозными оценками из 530 000 км<sup>2</sup> изученной территории 80 000 относятся к категории районов с весьма сложными и приблизительно 120 000 с преимущественно сложными инженерно-геологическими условиями разработки месторождений полезных ископаемых.

2. Установлено, что инженерно-геологические условия разработки месторождений многих горнодобывающих центров Урала не уникальны и встречаются в географически различных частях региона. Это позволяет использовать уникальный опыт разработки известных месторождений при освоении новых горнорудных районов.

3. Алгоритм типологического прогноза основан на принципах теории распознавания образов, что позволяет: значительно расширить возможности метода аналогий, использовать в многофакторных моделях инженерно-геологических ситуаций практически неограниченный материал наблюдений, автоматизировать операции обработки и анализа исходных данных и выполнение прогнозов, обеспечить объективную оценку достоверности полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
2. Бучкин М. Н. О парастерезисе горно-геологических процессов// Тез. докл. территориальной научно-технич. конф. «Изучение инженерно-геологических условий месторождений Урала различных генетических типов». Свердловск, 1983. С. 12.
3. Бучкин М. Н. Типологическое прогнозирование инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых крупного горнодобывающего региона (на примере Урала): Автореф. дис. ... канд. геол. мин. наук. М., 1985. 24 с.
4. Бучкин М. Н., Ткачук Э. И. Мониторинг горнодобывающего комплекса (на примере

- Нижне-Тагильского рудного района)//Матер. IV Междунар. конгресса по инженерной геологии. Ч. 2. Нью-Дели, 1982. С. 359—370.
5. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов (основные компоненты грунта и их взаимодействие). М.: Стройиздат, 1973. 372 с.
6. Комаров И. С. Задачи региональной инженерной геологии в современный период и некоторые вопросы инженерно-геологического картирования//Изв. вузов. Геология и разведка. 1966. № 10. С. 62—68.
7. Крутъ И. В. Введение в общую теорию земли. М.: Мысль, 1978. 317 с.
8. Скворцов Г. Г., Бобов Н. Г., Кориковская А. К. Инструкция по инженерно-геологическому изучению месторождений полезных ископаемых при их разведке. М.: Недра, 1975. 52 с.
9. Смирнов Б. В. Теоретические основы и методы прогнозирования горно-геологических условий добычи полезных ископаемых. М.: Недра, 1976. 120 с.
10. Смирнов Б. В. О задачах и принципах классификации объектов в инженерной геологии месторождений твердых полезных ископаемых//Инж. геология. 1983, № 3. С. 3—10.
11. Смирнов Б. И. Корреляционные методы при парагенетическом анализе. М.: Недра, 1981. 224 с.
12. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем. М.: Мысль, 1978. 272 с.
13. Шарапов И. П. Логический анализ некоторых проблем геологии. М.: Недра, 1977. 144 с.

Московский государственный университет  
ПГО Центргеология

Поступила в редакцию  
5.VII.1985

УДК 624.131

ПЕНДИН В. В., ХАЦКЕВИЧ А. Н.

**ОПЫТ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ  
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО  
АНАЛИЗА**

В настоящее время прогнозная оценка инженерно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых в большинстве случаев базируется на традиционном геологическом анализе. С нашей точки зрения он должен дополняться комплексной количественной оценкой, позволяющей более корректно решать задачи, связанные с прогнозом инженерно-геологических условий разработки месторождений. В этом направлении работают Б. В. Смирнов [7], Р. А. Дегтярев, А. Б. Бейботчаев, Ю. И. Чабдарова [3].

В качестве примера такой оценки рассмотрено полиметаллическое месторождение Рудного Алтая со сложными горно-геологическими условиями. Оно находится в пределах двух геоморфологических элементов: делювиального склона, расчлененного эрозионной сетью, и дна долины р. Бухтармы. Склон долины умеренно крутой ( $10-15^\circ$ ), относительное превышение над дном долины 450 м, ширина дна 3600 м. Склон покрыт чехлом делювиальных четвертичных суглинков мощностью от 10 до 60 м. Под дном долины залегает толща валунно-галечниковых отложений мощностью до 130 м.

Рудовмещающая толща представлена вулканогенно-осадочными породами эйфельского яруса среднего девона, прорванными телами кварц-полевошпатовых порфиров и дайками порфиритов верхнего девона — нижнего карбона. Залегание пород моноклиновое с субмеридиональным простираением и крутым падением на восток под углом  $70-80^\circ$ . Рудные тела залегают согласно с рудовмещающей толщей. Рудная зона субмеридионального простирания прослеживается под склоном и дном долины.

На месторождении выявлено несколько генетических типов зон и поверхностей ослабления массива горных пород: трещины, тектонические нарушения, дайки порфиритов, сланцеватость и линейные коры выветривания. Трещины и дайки разделяются по простиранию на четыре группы. Ослабленные зоны первой имеют субмеридиональное простирание с падением на восток и юго-восток. Эти зоны простираются в согласии с простиранием сланцеватости, рудных тел и большинства тектонических нарушений (азимут простирания  $355-35^\circ$ , углы падения  $30-45$ ,  $65-75^\circ$ ).

Зоны ослабления второй группы — северо-восточного простирания с падением на юго-восток и северо-запад (азимут простирания  $40-90^\circ$ , угол падения  $50-85^\circ$ ). Зоны ослабления третьей группы — юго-восточного простирания с падением на северо-восток и юго-запад (азимут простирания  $90-145^\circ$ , углы падения  $5-30$ ,  $60-90^\circ$ ).

Четвертая группа — юго-восточного простирания с падением на северо-восток. Трещины и дайки этой группы имеют ограниченное распространение.

Порфириты, кварц-полевошпатовые порфиры, туфопесчаники, алевролиты рудовмещающей толщи относятся к породам средней прочности

с сопротивлением на одноосное сжатие 34—51 МПа. В рудной зоне в связи с интенсивным окварцеванием пород прочность значительно выше — 125 МПа.

Зона разгрузки массива палеозойских пород выделена по прочностным свойствам и модулю трещиноватости. Нижняя граница зоны разгрузки проходит на глубине 150 м от поверхности палеозойских пород.

Инженерно-геологические исследования, проведенные в разведочной штольне, позволили оценить устойчивость зон ослабления и вмещающих пород при вскрытии их горными выработками, а также выявить зоны с высокой открытой пористостью и кавернозностью. Обрушение и вывалы приурочены к выветрелым дайкам порфиритов и породам, рассеченным трещинами с глиной трения. Наименее устойчивы дайки порфиритов. Проходка выработок по простиранию даек обычным буровзрывным способом с минимальным отставанием крепи невозможна.

Высокой пористостью и кавернозностью обладают линейные коры выветривания различных типов: контактные, сформировавшиеся по карбонатизированному контакту алевролитов и кварц-плахиоклазовых порфиров; развитые по поверхности ослабления даек; локальные линейные коры, сформировавшиеся по рудным телам. По ослабленным зонам следует ожидать водопритоков в горные выработки, причем их интенсивность различна, возможны даже катастрофические прорывы.

На основании данных предварительной разведки месторождения предложена схема типизации инженерно-геологических условий (табл. 1), использовавшаяся при составлении графической модели месторождения (рис. 1).

По геоморфологическому признаку выделяются два крупных элемента: дно долины р. Бухтармы и склон долины. Дальнейшее выделение таксономических единиц проводилось по следующим признакам: генезис пород, тектоническая нарушенность и выветрелость. Пространственное расположение пород относительно зоны разгрузки напряжений трактуется нами как литогенетический признак, поскольку породы выше и ниже зоны разгрузки претерпели различные эпигенетические изменения, которые во многом определили их свойства. Перечень геологических тел с их краткой характеристикой приведен в табл. 1.

Инженерно-геологические условия целесообразно рассматривать как систему формализованную, сознательно создаваемую модельную конструкцию, состоящую из отдельных взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов, обладающую эмерджентными свойствами<sup>1</sup>. По предложению Г. К. Бондарика такую систему называют инженерно-геологической (ИГС) [1].

Особенность системы — целостность проявляется в наличии у нее эмерджентных свойств. Эмерджентность ИГС выявляется в инженерно-геологической оценке соответствующей области литосферы. Оценка реального геологического объекта всегда специализирована по отношению к конкретным видам человеческой деятельности, поэтому значение того, или иного компонента в оценке ИГС и сама оценка предопределяются целевым назначением исследований.

Методика комплексной количественной оценки инженерно-геологических условий и специального мелкомасштабного и среднемасштабного инженерно-геологического районирования разработана В. В. Пендиным [2] применительно к строительству газопроводов, а крупномасштабного — Л. И. Оздоевой под руководством Г. К. Бондарика [5] для гражданского строительства.

Нами была предпринята попытка оценить сложность инженерно-геологических условий разработки участка месторождения и его типизации

<sup>1</sup> Эмерджентные свойства — свойства, не присущие каждому компоненту в отдельности, но характерные для системы в целом.

Таблица 1

## Типизация инженерно-геологических условий месторождения

Индекс геологического тела	Макроформа рельефа	Признак разделения			Прогнозное горно-геологическое явление
		генезис пород	Элемент геологической среды	тектоническая нарушенность	
1.1.0.0.	Дно долины	Аллювиальные отложения	—	—	Интенсивные водопритоки
1.2.4.1.		Породы зоны разгрузки	Ослабленные зоны	Выветрелые	Катастрофические прорывы воды и породы, обрушения
1.2.4.2.			Структурно-тектонические блоки	Невыветрелые	Водопритоки, вывалы
4.2.2.1.				Выветрелые	Катастрофические прорывы воды и породы, обрушения
4.2.2.2.				Невыветрелые	Водопритоки, вывалы
4.2.2.2.2.			Ослабленные зоны	»	То же
4.3.4.2.		Породы ниже зоны разгрузки	Структурно-тектонические блоки	»	Вывалы
1.3.2.2.		Делювиальные отложения	—	—	Деформация выработок, водопритоки
2.1.0.0.	Склон долины	Породы зоны разгрузки	Ослабленные зоны	Выветрелые	Обрушения, завалы
2.2.4.1.			Структурно-тектонические блоки	Невыветрелые	Вывалы
2.2.4.2.				Выветрелые	Обрушения, вывалы
2.2.2.2.				Невыветрелые	Вывалы
2.3.4.2.		Породы ниже зоны разгрузки	Зоны ослабления	»	Вывалы, обрушения
2.3.2.2.			Структурно-тектонические блоки	»	Вывалы

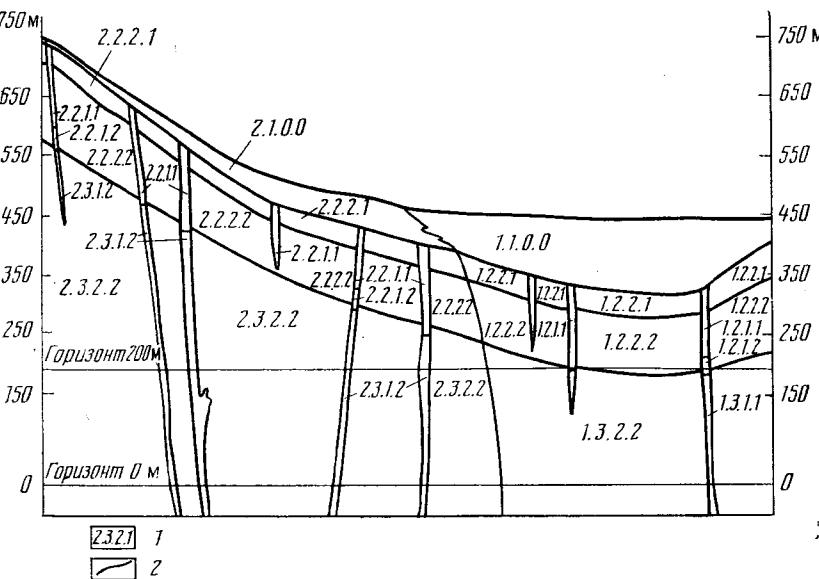


Рис. 1. Схематизированная модель инженерно-геологических условий месторождения в разрезе. 1 — индекс геологического тела; 2 — граница геологического тела

на основе комплексной количественной оценки ИГС. В качестве количественной меры эмерджентности ИГС целесообразно использовать интегральный показатель инженерно-геологических условий  $I_{\Sigma}$ , представляющий собой линейную аддитивную функцию взвешенных по вкладу в оценку нормированных значений компонентов ИГС

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n g_i R_i^n, \quad (1)$$

где  $g_i$  — вес  $i$ -го компонента ИГС,  $R_i^n$  — нормированная оценка  $i$ -го показателя,  $n$  — число компонентов.

Для установления величины вклада каждого компонента ИГС в комплексную оценку использован множественный корреляционный анализ связи количественных характеристик компонентов ИГС и целевой функции (коэффициента удорожания сооружения горных выработок) [2].

$$K_{уд} = f(x_1, x_2 \dots x_p), \quad (2)$$

$$K_{уд} = S/S_{min},$$

где  $K_{уд}$  — коэффициент удорожания,  $S$  и  $S_{min}$  — соответственно стоимость и минимальная стоимость проходки и крепления 1 пог. м выработки для данного месторождения,  $x_1, x_2, \dots, x_p$  — количественные характеристики компонентов ИГС.

Вес компонентов рассчитывается по формуле

$$g_i = \frac{|\beta_i r_{iy}|}{\sum_{i=1}^p |\beta_i r_{iy}|}, \quad (3)$$

где  $\beta_i$  — стандартизированные коэффициенты множественной регрессии,  $r_{iy}$  — парные коэффициенты корреляции между коэффициентами удорожания и количественными показателями компонентов ИГС.

Компоненты ИГС выражены в различных единицах, поэтому их необходимо перевести в относительные величины. Эта операция может быть осуществлена путем деления частных значений компонента на максимально возможное в пределах месторождения. При таком способе нормирования все показатели  $R_i$  варьируют от 0 до 1, где 0 характеризует наиболее благоприятное значение компонентов ИГС, а 1 — наиболее неблагоприятное. Методика реализована на одном из месторождений Рудного Алтая со сложными горно-геологическими условиями.

Выбор компонентов инженерно-геологических условий и их показателей, определяющих стоимость разработки месторождения подземным способом, проведен на основании обзора литературы по изысканиям и проектированию горных предприятий рудных месторождений. Выбраны следующие компоненты и их количественные характеристики:

1. Рельеф		
1.1. Расчлененность рельефа месторождения		$h, \text{ м}$
2. Гидрогеологические условия		
2.1. Величина столба воды над кровлей горной выработки		$H, \text{ м}$
2.2. Обводненность ослабленной зоны		$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$
3. Строение и свойства зон ослабления		
3.1. Угол падения ослабленной зоны		$\theta, \text{ град}$
3.2. Показатель извилистости стенок и заполнителя трещин		$K$
3.3. Мощность ослабленной зоны		$M, \text{ м}$
3.4. Коэффициент крепости заполнителя ослабленной зоны		$f_{\text{кр}}$
4. Строение и свойства структурно-тектонических блоков		
4.1. Среднее расстояние между поверхностями ослабления		$l, \text{ см}$
4.2. Прочность породы на одноосное сжатие в образце		$R, \text{ МПА}$
5. Технологические условия		
5.1. Глубина залегания горной выработки		$H_p, \text{ м}$
5.2. Угол встречи ослабленной зоны и выработки		$\alpha, \text{ град}$

Некоторые из перечисленных показателей компонентов ИГС нуждаются в пояснении. Расчлененность рельефа месторождения на участке расположения подземных горных выработок определяется как разность абсолютных отметок рельефа.

Показатель извилистости стенок и заполнителя трещин — это безразмерная величина, равная отношению суммарной мощности заполнителя и каймы выветривания к высоте неровностей на стенке трещины в пределах элементарного блока.

Обводненность ослабленной зоны оценивается следующими градациями водопритока: капеж прерывистый  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; струйчатое истечение  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; интенсивный водоприток  $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Коэффициент крепости глинистого заполнителя зон ослабления трещин определяется по формуле

$$f_{\text{кр}} = \operatorname{tg} \varphi + C/P,$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения породы;  $C$  — сцепление;  $P$  — вертикальное давление.

Коэффициент крепости скального и полускального заполнителя определен по данным «Справочника по физико-механическим свойствам горных пород» [4]. Стоимость сооружения 1 пог. м выработки получена по сборнику расценок на горно-проходческие работы Гипроцветмета. Тип крепления выбирался по рекомендациям СНИП-11-94-80 [8], а также исходя из опыта проходки разведочной штольни Майская. В связи с различными условиями залегания рудных тел проектируется два способа вскрытия месторождения: штольневый и шахтный. Для подготовительных горных выработок при шахтном способе вскрытия вводился коэффициент удорожания стоимости 1,8 (выработки горизонта 0 м) и

1,6 (горизонта +200 м). Коеффициент удорожания взят из сборника расценок Гипроцветмета.

Влияние водопритока на стоимость сооружения горной выработки учитывалось введением в расчет поправочных коэффициентов: 1,11 — в случае прерывистого капежа и 1,25 — при струйчатом истечении. Мероприятия по предотвращению интенсивного водопритока вошли в стоимость специальных методов проходки выработок (сборник расценок Гипроцветмета).

Рассчитанный коэффициент удорожания изменялся в широких пределах от 1 до 8,61 за счет большого разнообразия инженерно-геологических условий месторождения. Выбор участков горизонтальных вскрывающих и подготовительных выработок, для которых подсчитывались показатели компонентов ИГС и коэффициенты удорожания, проводился на основании схемы инженерно-геологической типизации (см. табл. 1 и рис. 1). Участки расположены относительно равномерно по горизонтам месторождения 513, 200 и 0 м, под склоном и дном долины, а также выше и ниже границы зоны разгрузки массива горных пород.

Для решения поставленных задач были разработаны три модели.

Модель I позволяет оценивать инженерно-геологические условия сооружения горных выработок месторождения при совместном шахтном и штольневом способах вскрытия. В пределах месторождения было выбрано 67 квазиоднородных участков, каждому из которых поставлено в соответствие значение коэффициента удорожания и количественных характеристик компонентов ИГС. Для модели рассчитаны парные коэффициенты корреляции между компонентами и составлены корреляционные матрицы. Кроме этого, оценен вклад каждого компонента в коэффициент удорожания.

Уравнение в стандартизированной форме, описывающее первую модель, имеет следующий вид

$$K_{уд} = 0,399f_{kp} + 0,342Q + 0,241M + 0,0181R + 0,032K - 0,111l - 0,091\theta - 0,285\alpha - 0,574h,$$

где  $f_{kp}$ ;  $Q$ ,  $M$ ,  $R$ ,  $K$ ,  $l$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $h$  — количественные характеристики компонентов ИГС в стандартизированной форме (условные обозначения приведены выше). Коэффициент множественной корреляции 0,85, что свидетельствует об адекватности модели натурным данным.

Модель II предназначена для части месторождения, залегающей под склоном, которая будет вскрываться штольневым способом. Число квазиоднородных участков для этой модели 44. Получено следующее уравнение множественной регрессии (в стандартизированной форме)

$$K_{уд} = 0,460f_{kp} + 0,410Q + 0,272M + 0,0190R + 0,058l - 0,074K - 0,090H_p - 0,141\theta - 0,345\alpha.$$

Коэффициент множественной корреляции 0,80.

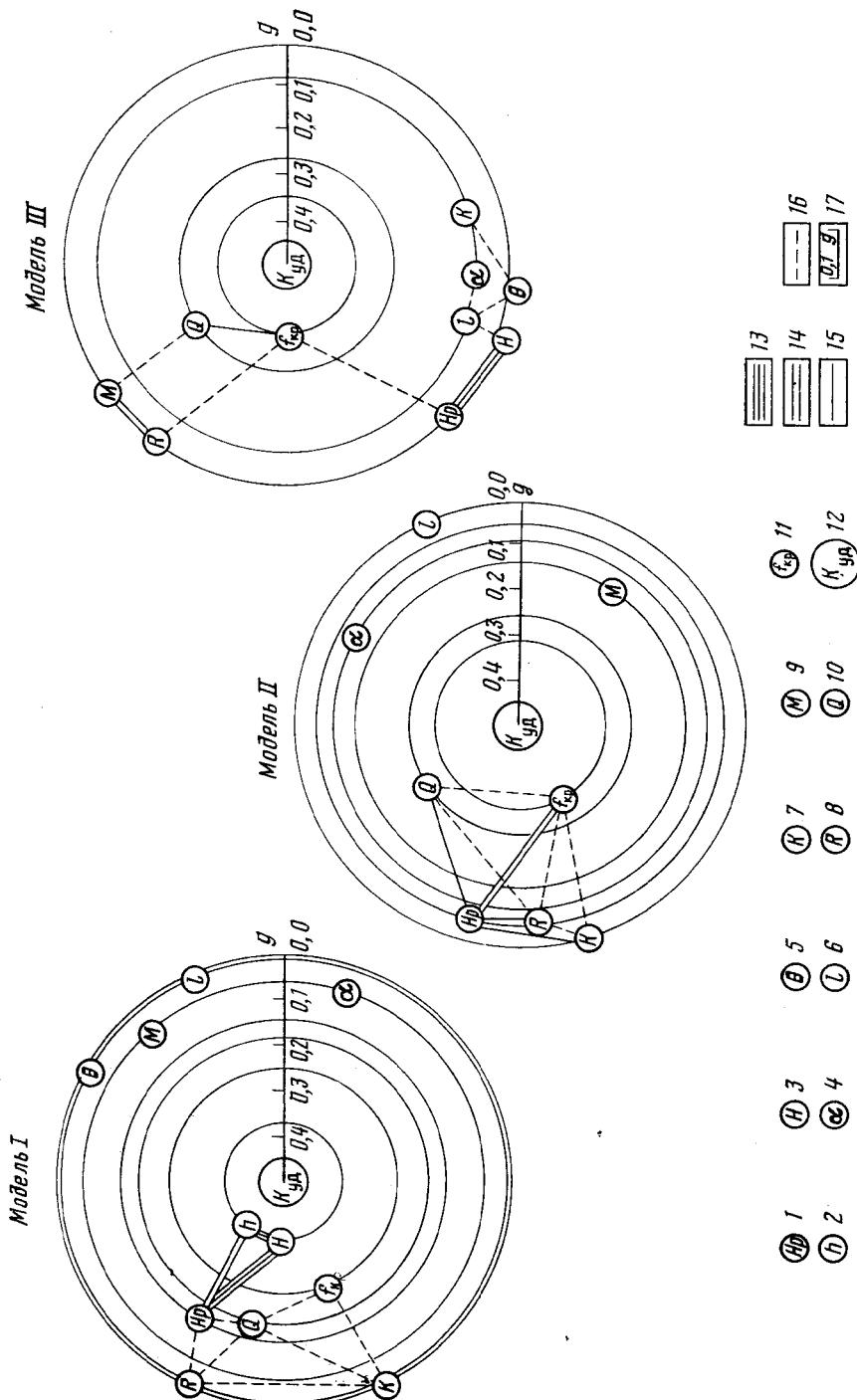
Модель III характеризует долинную часть месторождения на уровне горизонтов +200 и 0 м. Объем исходного материала 23 участка. Уравнение имеет следующий вид:

$$K_{уд} = 0,465f_{kp} + 0,461Q + 0,335K + 0,212M + 0,115H_p + 0,0165R + 0,022\theta - 0,294\alpha - 0,193l.$$

Коэффициент множественной корреляции 0,90.

Полученные числовые результаты представлены на рис. 2. В центре

Рис. 2. Структурная схема моделей взаимосвязей компонентов ИГС. 1 — глубина залегания горной выработки; 2 — расщепленность рельефа; 3 — величина столба воды над кровлей выработки; 4 — угол встречи ослабленной зоны и выработки; 5 — угол падения ослабленной зоны; 6 — среднее расстояние между поверхностями ослабления; 7 — извилистость стенок трещин; 8 — прочность подпора на одноосное сжатие; 9 — мощность ослабленной зоны; 10 — обводненность ослабленной зоны; 11 — коэффициент крепости заполнителя ослабленной зоны; 12 — коэффициент удорожания; 13—16 — парные коэффициенты корреляции: 13 — > 0,9; 14 — 0,7—0,9; 15 — 0,5—0,7; 16 — 0,3—0,5; 17 — доля вклада компонента в коэффициент удорожания



диаграмм находится коэффициент удорожания сооружения горных выработок. Компоненты удалены от центра на расстояния, пропорциональные их вкладам в уравнение регрессии. Чем дальше от центра индекс компонента, тем меньше доля его участия в коэффициенте удорожания. Характер и интенсивность природных связей между компонентами оценивается коэффициентом парной корреляции.

Анализ полученных зависимостей позволяет выделить группы компонентов по тесноте связей и их устойчивости.

Компоненты первой группы имеют устойчивые связи с коэффициентом удорожания и между собой во всех трех моделях. Коэффициент крепости заполнителя зон ослабления тесно связан с коэффициентом удорожания. Это объясняется тем, что заполнитель существенно влияет на устойчивость пород в стенках подземных выработок. Следует отметить связь заполнителя с обводненностью. Пластичный заполнитель (глинистый, хлоритовый, серицитовый) является водоупорным. Доля вклада такого компонента, как угол встречи ослабленной зоны и выработки, в коэффициент удорожания колеблется от 0,062 до 0,115. Его влияние, очевидно, проявляется через устойчивость пород. Обводненность пород также имеет тесную связь со стоимостью проходки за счет проведения мероприятий по осушению выработки, снижения производительности труда, усиления крепи горных выработок. Устойчивая связь глубины залегания выработки и крепости заполнителя трещин обусловлена тем, что прочность заполнителя на верхних горизонтах месторождения существенно снижается за счет воздействия выветривания.

Компоненты второй группы характеризуются высокими значениями тесноты связей на разных моделях. В первой модели существенный вклад в коэффициент удорожания дают глубина залегания выработки, расчлененность рельефа и влияние напора воды. Расчлененность рельефа определяет способ подземного вскрытия месторождения: штольневый или шахтный. Зависимость между коэффициентом удорожания и данным показателем прямая, поскольку штольневый способ, применяемый при расчлененном рельефе, значительно дешевле, чем шахтный. Следует отметить, что расчлененность рельефа и величина напора воды тесно связаны между собой, а также с третьим техногенным показателем — глубиной залегания горной выработки. Связь первых двух объясняется тем, что участок с минимальной расчлененностью рельефа (дно долины реки) обладает максимальным напором воды. Зависимость глубины залегания выработок и расчлененности обусловлена тем, что глубокие горизонты месторождения находятся в его долинной части.

Во второй модели кроме компонентов первой группы значимый вклад в коэффициент удорожания вносят мощность ослабленной зоны и глубина залегания горной выработки. Влияние этих двух показателей проявляется через устойчивость пород в подземной выработке. Чем мощнее зона ослабления, тем больше горное давление и стоимость крепления. При штольневом вскрытии устойчивость пород повышается от устья по простианию штольни.

И наконец, в третьей модели существует вклад показателей извилистости стенок трещин и расстояния между трещинами. Как и коэффициент крепости заполнителя, эти показатели характеризуют сцепление между блоками породы в массиве и устойчивость выработок. Влияние расстояния между трещинами на устойчивость пород очевидна.

Компоненты третьей группы вносят небольшой вклад в коэффициент удорожания. Эта группа относительно немногочисленная, она включает прочность пород на одноосное сжатие и угол падения ослабленной зоны. Влияние прочности пород на коэффициент удорожания имеет двойственный характер. С ростом прочности увеличиваются затраты на проходку горной выработки и уменьшаются расходы на ее крепление. Снижение прочности приводит к обратной зависимости. Поэтому коэффициент удо-

рожания незначительно изменяется для пород различной прочности и компенсируется другими компонентами.

Ниже приводится оценка сложности инженерно-геологических условий проходки полевого штрека горизонта +200 м, выполненная по модели III. Полоса проектирования штрека разбита на квазиоднородные элементы. Размеры элементов подбирались с тем условием, чтобы режим изменчивости характеристик компонентов ИГС в их пределах был квазистационарным. Для каждого элемента получены численные значения переменных, исходя из следующих соображений.

Угол встречи  $\alpha$  определялся по геологическому плану горизонта +200 м как угол между простиранием пород и осью выработки. Средние расстояния между поверхностями ослабления  $l$  для различных пород находились по зависимостям изменения этого показателя с глубиной, полученным в результате предварительной разведки месторождения.

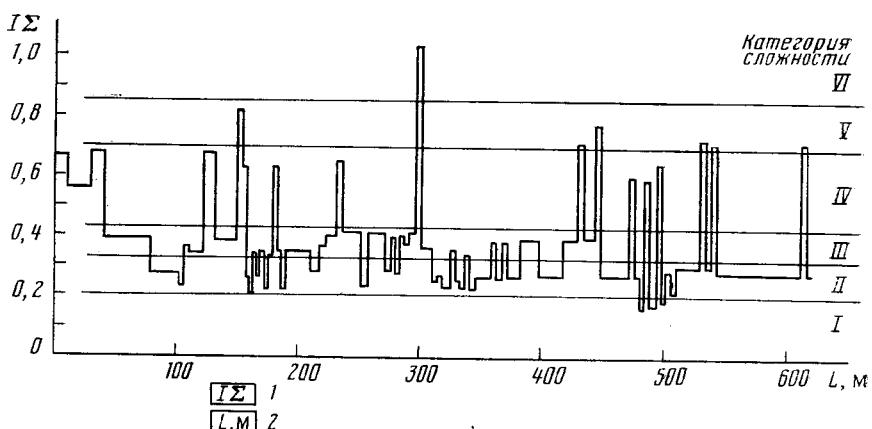


Рис. 3. Диаграмма интегрального показателя ИГС по простиранию полевого штрека. 1 — интегральный показатель ИГС; 2 — длина полевого штрека, м

Показатели шероховатости стенок  $K$  и крепости заполнителя зон ослабления  $f_{kp}$  рассчитывались на основании наблюдений в подземных выработках, лабораторного изучения свойств пород, а также документации керна скважин. Обводненность массива  $Q$  с водопритоками более  $6 \text{ м}^3/\text{ч}$  получена расчетным путем, а в остальных случаях в зависимости от степени раскрытии и заполнителя трещин по градации: капеж  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; струйчатое истечение  $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; водоприток  $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Частные значения количественных характеристик компонентов нормировались и по ним рассчитывались интегральные показатели ИГС  $I_\Sigma$ . Была построена диаграмма интегрального показателя ИГС по трассе полевого штрека горизонта +200 м (рис. 3). На основе логического анализа диаграммы выделено шесть категорий сложности инженерно-геологических условий сооружения полевого штрека. В табл. 2 приведены наименования пород, размах интегрального показателя сложности и частных значений независимых переменных. Е. М. Пашкин считает, что одним из методов управления природно-технической геосистемой массив горных пород — выработка является выбор оптимального направления подземной выработки [6]. На основе комплексной количественной оценки ИГС можно сравнивать варианты трасс некоторых горных выработок на количественной основе. Для этого необходимо рассчитать суммарный показатель сложности инженерно-геологических условий для различных

Таблица 2

**Категории сложности инженерно-геологических условий сооружения полевого штрука горизонта +200 м месторождения**

Категория сложности	Геологическая характеристика	$I_{\Sigma}$	$\alpha^{\circ}$	$l$ , см	$K$	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$f_{kp}$
I	Кварцевые порфириты	0,168—0,178	79—83	83	0,47	0	10,2
II	Руда вкрапленная Порфиры окремненные Порфириты Туфопесчаники	0,21—0,27 0,22—0,28 0,21—0,30 0,26—0,28	0—44 3—44 10—79 40—79	63—100 50—83 50 30	0,21 0,21—0,7 0,6 0,31	0—0,1 0—0,1 0,1 0—0,1	7,2—10,2 10,2 10,2 7,2
III	» Порфириты Кварцевые порфириты, глыбовая зона коры выветривания	0,34—0,39 0,34—0,39 0,4—0,41	4—45 5—45 21—29	25 50 30	0,31 0,6 0,26	0—0,1 0,1 0,1	7,2 7,2—10,2 5,4
IV	Порфириты, глыбовая зона коры выветривания	0,63—0,68	4—40	20	1,5	3,0	5,4
V	Разломы	0,58—0,64	20—60	8	1,1	0,1	0,64
VI	»	0,71—0,82	25—69	8—33	1,0—1,1	3,0—6,0	0,6
		1	43	33	1,0	до 1510	0,6

вариантов трассы по формуле

$$\bar{J}_{\Sigma}^n = \sum_{j=1}^m I_{\Sigma j} a_j,$$

где  $\bar{J}_{\Sigma}^n$  — суммарный показатель сложности по  $n$ -му варианту трассы;  $I_{\Sigma j}$  — интегральный показатель сложности  $j$ -того квазиоднородного участка;  $a_j$  — длина квазиоднородного участка по трассе выработки. Затем из сравниваемых вариантов нужно выбрать тот, что имеет наименьший показатель  $\bar{J}_{\Sigma}^n$ .

### Выводы

1. Использование комплексной количественной оценки инженерно-геологических условий позволило дать обоснованный прогноз для целей проходки эксплуатационной горной выработки при разработке месторождения.

2. Использование множественного корреляционного анализа позволило выявить структуру взаимосвязи компонентов инженерно-геологических условий и коэффициента удорожания вскрытия месторождения шахтным, штольневым и комбинированными способами. Независимо от способа вскрытия месторождения существенное влияние на стоимость проходки горных выработок оказывают следующие показатели компонентов инженерно-геологических условий: обводненность выработки, коэффициент крепости заполнителя ослабленной зоны, угол встречи ослабленной зоны и выработка. Совместный анализ шахтного и штольневого способа вскрытия кроме перечисленных показателей выявил влияние расчлененности рельефа и мощности ослабленной зоны.

3. Полученные результаты могут быть использованы для управления природно-технической геосистемой массив горных пород — выработка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981, с. 256.
2. Бондарик Г. К., Пендин В. В. Методика количественной оценки инженерно-геологических условий и специального инженерно-геологического районирования.— Инж. геология, 1982, № 4, с. 82—89.
3. Дегтярев Р. А., Байбаттаев А. Б., Чабдарова Ю. И. Особенности инженерно-геологического районирования месторождения Джезказган.— Инж. геология, 1985, № 5, с. 73—78.
4. Любимов Н. И., Пасенко Л. И. Справочник по физико-механическим параметрам горных пород рудных районов. М.: Недра, 1978, с. 180—181.
5. Оздоева Л. И. Разработка методики крупномасштабного инженерно-геологического районирования городских территорий (на примере г. Грозного): Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. геол.-минер. наук. М.: МГРИ, 1981.
6. Пащкин Е. М. Инженерно-геологические исследования при строительстве туннелей. М.: Недра, 1981. 35 с.
7. Смирнов Б. В. Теоретические основы и методы прогнозирования горно-геологических условий добычи полезных ископаемых по геологоразведочным данным. М.: Недра, 1976. 120 с.
8. Строительные нормы и правила. II, гл. 94 (СНИП-II-94-80). М.: Стройиздат, 1982. с. 16—20.

Московский геологоразведочный  
институт

Поступила в редакцию  
2.VIII.1983

УДК 624.131

ЗАПОРОЖЧЕНКО Э. В., ДЕРБИНЯН Г. А.

## ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПРИ МЕЛИОРАЦИИ ЗЕМЕЛЬ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ

На Северном Кавказе мелиорация земель — важнейшее звено агропромышленного комплекса. Здесь проводится планомерная работа по расширению орошаемых земель. В сферу мелиорации будут вовлечены новые крупные массивы. Ни один другой вид инженерной деятельности, в том числе и гидроэнергетическое строительство, не конкурирует с мелиорацией по территориальной масштабности изменений, вносимых в природные условия. По интенсивности воздействия на геологическую среду мелиоративное строительство является одним из наиболее мощных комплексных антропогенных факторов, которые в сравнительно короткие сроки существенно изменяют инженерно-геологическую и гидрогеологическую обстановку на площадях, нередко значительно превышающих размеры «очагов» непосредственного воздействия.

Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания в обоснование проектов мелиоративного строительства на Северном Кавказе проводят специализированные институты. В последние годы мелиоративное строительство на Северном Кавказе существенно сдерживается ограниченностью поверхностных водных ресурсов. Из-за несоответствия режимов бытового стока и водопотребления в бассейне р. Терек уже сейчас возникают сезонные дефициты воды, что обусловливает недополив орошаемых земель. С целью улучшения водохозяйственной обстановки институтом «Севкавгипроводхоз» разрабатывались проекты строительства канала Волга — Чограй, а также Терско-Малкинского регулирующего водохранилища, расположенного ниже слияния Терека с Малкой. Осуществление указанных проектов, однако, полностью задачу освоения мелиоративного фонда не решает. Большой резерв расширения площади орошаемых земель в бассейне р. Терек — пресные подземные воды.

Природные условия Северного Кавказа весьма разнообразны и в инженерно-геологическом и гидрогеологическом отношении в целом сложные. Северные и восточные склоны Ставропольской возвышенности, Ергенинская возвышенность, Терско-Кумское междуречье, Надтеречная равнина и др. сложены мощной толщей просадочных разностей лёссовых пород.

В густо изрезанной овражно-балочной сетью центральной части и на южных склонах Ставропольской возвышенности практически с поверхности широко распространены морские аргиллитоподобные глины майкопской серии, к которым приурочены оползни различного масштаба и происхождения, в том числе и антропогенные. Большая часть Восточного Предкавказья относится к слабодренированной и весьма слабодренированной зонам. Здесь низкие элементы рельефа — пойма и первая надпойменная терраса рек отличаются, как правило, близким исходным (до орошения) залеганием грунтовых вод, чаще всего на глубинах 1—2 м. Это неблагоприятное обстоятельство в условиях недостаточного развития инженерных мер приводит к подтоплению территории, вторичному засолению почв и грунтов. На северных склонах Кавказского хребта интенсивна деятельность современных экзогенных процессов, часты сти-

хийные явления, вызванные или подготовленные этими процессами. К последним относятся: гляциально-нивальные (снежные лавины), гравитационные (обвалы, осыпи, оползни) и эрозионно-аккумулятивные (ливневые потоки, сели, повадки, подмыв берегов и пр.). Особенно значительное развитие получили в последние годы селевые явления.

Ниже на основе многолетнего опыта инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий института «Севкавгипроводхоз» рассмотрены ряд актуальных задач и пути их решения на наиболее характерных для Северного Кавказа территориях мелиоративного строительства.

**Изыскания на территориях, сложенных лёссовыми породами.** Более 60% мелиоративной площади рассматриваемой территории сложены лёссовыми породами делювиального, делювиально-эолового и делювиально-пролювиального генезиса. В разрезе делювиально-эоловых отложений преобладают супеси, делювиально-пролювиальных и делювиальных — суглинки. Мощность отложений измеряется от нескольких метров до нескольких десятков метров. По данным исследований около 2 тыс. образцов, отобранных в верхней 20-метровой толще, среднее число пластичности лёссовых пород 0,07, степень влажности 0,31, коэффициент пористости 0,81, относительная просадочность 0,032.

Анализ материалов инstrumentальных наблюдений с помощью поверхностных и глубинных реперов за опытным замачиванием ряда объектов, например, трассы Октябрьского распределителя (система Большого Ставропольского канала), сложенной 40-метровой толщей просадочных пород, показывает, что в интервале 20—40 м вертикальные деформации при природном давлении составляют по данным замеров на 12 опытных площадках от 6 до 20, в среднем 12% от общей просадки всей толщи. Это обстоятельство подтверждает допустимость для инженерной практики прямого прогноза просадочных деформаций лёссовой толщи на принятую в регионе глубину 20 м с поправками на полную мощность, используя метод аналогии.

Исследования [1] показывают, что на формирование свойств лёссовых пород на Северном Кавказе наряду с другими факторами в значительной мере влияет подстилающий слой. Если в основании лёссовой толщи залегают дренирующие слои (пески, галечники), то лёссы характеризуются сравнительно малой влажностью, значительной пористостью, твердой и полутвердой консистенцией, отличаются большой просадочностью даже при природных давлениях, иногда подвержены суффозионным процессам. В породах, подстилаемых водоупором (глины и др.), менее выражены «лёссовые» свойства. Относительная просадочность и мощность просадочной зоны уменьшаются, в толщах нередко наблюдается высокий уровень грунтовых вод.

Эксплуатация мелиоративных систем на Северном Кавказе свидетельствует о необходимости учета послепросадочного уплотнения лёссовых пород. Расхождения между прогнозируемыми на основе стандартных лабораторных испытаний лёссовых пород и фактическими просадками достигают часто недопустимых, по условиям нормальной эксплуатации гидротехнических сооружений, величин.

В целях устранения несоответствия между прогнозом и натурой в институте «Севкавгипроводхоз» А. Н. Хуртиным [5] разработан и внедрен аналитический метод количественной оценки просадочности лёссовых пород с учетом длительной фильтрации, в основу которого положена тесная корреляционная зависимость результатов лабораторных испытаний на длительную фильтрацию и однократное замачивание. Установленная зависимость имеет следующий вид:

$$\epsilon_{sl\phi} = \frac{\epsilon_{max}}{\frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{sl}} 0,4 + 0,6},$$

где  $\epsilon_{sl\phi}$  — относительная просадочность с учетом длительной фильтрации;  $\epsilon_{max}$  — максимальное относительное уплотнение, рассчитывается по формуле  $\epsilon_{max} = \frac{e_p - e_{max}}{1 + e}$ ,  $\epsilon_{sl}$  — относительная просадочность;  $e_{max}$  — коэффициент пористости при максимальном уплотнении под соответствующим давлением, рассчитывается по формуле  $e_{max} = (0,515e + 0,530) \cdot (0,0134W_L + 0,225) - 0,008(W_L - 10)\lg 10P$ ;  $e_p$  — коэффициент пористости естественно влажной породы под соответствующим давлением;  $W_L$  — влажность на границе текучести, %;  $P$  — давление, МПа;  $e$  — коэффициент пористости в естественном сложении.

Многолетняя практика использования аналитического метода свидетельствует о существенном уточнении количественного прогноза и действенности, разрабатываемых на основе такого прогноза инженерных мероприятий по недопущению или ограничению деформации сооружений. Идут поиски и других, основывающихся на обобщении материалов изысканий прошлых лет. В. И. Гончаров, В. Н. Петенев, Д. Я. Фрейман («Севкавгипроводхоз») путем статистической обработки данных более 3 тыс. лабораторных испытаний пришли к выводу о том, что с ростом величин просадочной деформации от 0,05 до 1,5 м значение коэффициента послепросадочного уплотнения снижается. На этой основе были разработаны [2] соответствующие региональные показатели.

**Изыскания на подтопленных и подтапливаемых территориях.** Подтопление, вызванное подъемом уровня грунтовых вод под воздействием оросительных систем, развивается во всех природно-мелиоративных районах Северного Кавказа, определяясь обычно соотношением между инфильтрационным питанием грунтовых вод и их подземным стоком. Этот неблагоприятный процесс наблюдается даже на повышенных элементах рельефа (вторая и третья надпойменные речные террасы, водораздельные пространства) с исходной глубиной залегания грунтовых вод 5—10 м и более, но характеризующихся слабой естественной дренированностью. Здесь при непринятии мер инженерно-мелиоративного характера подтопление наступает в первые 5—10 лет орошения. Скорость подъема уровня грунтовых вод на орошаемых землях колеблется от 0,5 до 1 м/год, на сопредельных с ними — от 0,2 до 0,3 м/год.

Для понижения уровня грунтовых вод и создания благоприятной мелиоративно-гидрогеологической обстановки на подтопленных и подтапливаемых землях применяется закрытый горизонтальный дренаж; значительно реже, в условиях плотной застройки, на территории населенных пунктов, — вертикальный или комбинированный. Слабо дренированная и весьма слабо дренированная зоны Северного Кавказа характеризуются слоистым геолого-литологическим разрезом — чередованием песчаных и глинистых пластов. При расчете дренажа на осушаемых и защищаемых от подтопления землях большое значение имеют данные о проницаемости первого от поверхности земли разделяющего глинистого пласта. Не располагая подобными данными, на протяжении многих лет разделяющие пласти часто некорректно относились к водоупорам ( $K_\phi = 0$ ) с вытекающими отсюда недостоверными прогнозными гидрогеологическими расчетами. К примеру, на основе анализа уровенного режима подземных вод эксплуатируемого Прохладненского месторождения пресных подземных вод, запасы которого подсчитаны без учета подпитывания из нижнечетвертичного напорного водоносного горизонта, установлено, что реальные понижения уровней подземных вод в наблюдательных скважинах оказались существенно меньшими, чем прогнозные. Так, на восьмой год эксплуатации месторождения в проектном режиме уровень подземных вод в наблюдательной скважине, расположенной в 430 м от водозабора, понизился только на 3,3 м вместо ожидаемого 12,5 м. В скважине, отстоящей от водозабора на расстоянии 2000 м, влияние его прак-

тически не ощущалось, хотя расчетное понижение уровня подземных вод составило 8,6 м.

В последние годы институту «Севкавгипроводхоз» удалось на ряде водохозяйственных объектов в бассейне р. Терек изучить путем проведения специальных и продолжительных по времени (до 15 сут) кустовых откачек с «поэтажным» расположением пьезометров естественную фильтрационную способность разделяющих глинистых слоев. Установлено, что разделяющие слои по фильтрационным свойствам неоднородны — по данным 10 откачек  $K_f$  меняется от 0,0001 до 0,05 м/сут, в среднем 0,009 м/сут. Развитие исследований такого плана с использованием результатов режимных наблюдений и решением обратных задач на ЭВМ и аналоговых машинах позволит повысить достоверность гидрогеологических расчетов и прогнозов.

Существенные осложнения возникают при прогнозных расчетах влияния орошения на уровень режима сравнительно глубокозалегающих (30—40 м) грунтовых вод на массивах, сложенных мощной толщей неоднородных по водопроницаемости лессовых пород, так как современные методы прогноза не отражают в целом сложные закономерности перемещения влаги в зоне аэрации. В подобных природных условиях результаты количественного прогноза часто нереальны и в значительной мере противоречат характеру и интенсивности изменения гидрогеологической обстановки, известным из многолетней практики эксплуатации ряда орошаемых участков и экспериментальных наблюдений за натурным предварительным замачиванием толщ просадочных пород. В этом отношении возрастают роль и научно-практическое значение изучения и использования при обосновании мелиоративного строительства природных аналогов и опыта их эксплуатации. Разработка надежных критериев презентивности природных аналогов — один из актуальных вопросов инженерно-геологической и гидрогеологической науки.

Как показывает опыт института «Севкавгипроводхоз», к основным факторам совершенствования инженерно-геологических изысканий, повышения их качества и эффективности относятся: внедрение новой техники и технологий, в первую очередь геофизических методов, установление и использование (особенно на начальных стадиях проектирования) корреляционных зависимостей между характеристиками водно-физических, механических и фильтрационных свойств пород, использование материалов съемочных работ производственного объединения «Севкавгеология», изучение и использование природных аналогов, разработка региональных таблиц нормативных значений прочностных и деформационных характеристик пород, применение дистанционных методов изысканий и др.

Большим подспорьем, к примеру, являются материалы комплексных инженерно-геологических и гидрогеологических съемок масштаба 1 : 200 000, выполняемых производственным объединением «Севкавгеология». Таких съемок проведено на общей площади более 30 тыс. км<sup>2</sup> — система Большого Ставропольского канала, Зеленокумская, Левоегорлыкская, Шпаковская и Карапогайская системы. При комплексных съемках наряду с решением специальных инженерно-геологических и гидрогеологических задач успешно изучаются важные для региональной геологии вопросы стратификации лессовых пород, гидрогеологической стратификации и др.

Дальнейшее повышение качества и эффективности инженерно-геологических изысканий в мелиоративной отрасли во многом зависит от решения организационных задач.

**Усовершенствование нормативной базы изысканий.** Сейчас в области инженерной геологии и гидрогеологии действует более 600 инструкций, указаний и других документов. Помимо затруднений для самих изыскателей это позволяет экспертизе требовать излишнюю письменную и гра-

фическую информацию и доказательства, что ведет к неоправданным объемам отчетов, обоснований, приложений к ним. В отрасли отсутствуют утвержденные нормативно-методические документы по наиболее важному вопросу инженерно-геологических изысканий — выбору состава и объема работ. В целом нормативная база изысканий устарела и не отвечает возросшим требованиям, связанным с необходимостью обоснования, в частности, природоохранных мероприятий.

**Укрепление научно-производственных связей проектного института с гидрогеолого-мелиоративной службой.** Гидрогеолого-мелиоративная служба в системе Минводхоза СССР действует с 1977 г. В ее задачи входят: регулярные наблюдения за режимом уровня, минерализацией и химическим составом грунтовых вод, а также за водно-солевым режимом почв, оперативный анализ материалов наблюдений с установлением причин, вызывающих ухудшение гидрогеолого-мелиоративной обстановки и прогноз дальнейших ее изменений, оперативное планирование и осуществление мероприятий по предупреждению возможного ухудшения гидрогеолого-мелиоративной обстановки или по улучшению ее [3]. Анализ шестилетней работы Ставропольской гидрогеолого-мелиоративной партии, наиболее крупного подразделения гидрогеолого-мелиоративной службы в зоне деятельности института «Севкавгипроводхоз», показывает, что качество и эффективность этой службы могут быть повышены при учете следующих замечаний: наблюдательные скважины должны привязываться инструментально в плановом и высотном отношении; необходимо расширить сеть наблюдательных скважин на сопредельных к мелиоративным массивам территориях, а также проанализировать накопленные данные с целью выбора наиболее информативных и характерных точек и сокращения числа наблюдательных скважин, дублирующих сведения; заменить временные наблюдательные скважины постоянными, оборудованными фильтровыми колоннами с оголовками; к годовым техническим отчетам целесообразно прикладывать фактический материал наблюдений за режимом грунтовых вод, анализы водных вытяжек, карты засоления почв и грунтов.

Обобщение материалов прошлых лет позволило бы получить общую характеристику инженерно-геологических и гидрогеологических условий, провести районирование с типизацией условий и расчетных гидро-геологических схем, составить карты изученности, региональные таблицы прочностных и деформационных характеристик пород, каталоги их состава и свойств и пр. Многолетний опыт одного из проектных институтов системы Госстроя УССР — УкрвостокГИИТИЗА [4] подтверждает, что только при целенаправленной материальной поддержке может быть организована планомерная систематизация материалов изысканий прошлых лет на принципиально новой основе — автоматизации с использованием ЭВМ, позволяющей сберечь значительные материальные ресурсы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В. П. О влиянии подстилающего слоя на свойства лессовых пород//Проблемы инженерной геологии Северного Кавказа. Вып. 2. Ставрополь, 1969. С. 50—55.
2. Запорожченко Э. В. Предварительное замачивание просадочных пород — опыт изысканий, проектирования и строительства//Сб. научных трудов института «Севкавгипроводхоз». Вып. 6. М., 1980. С. 56—74.
3. Кац Д. М. Гидрогеологические основы контроля мелиоративного состояния орошаемых земель//Гидротехника и мелиорация. 1982. № 6. С. 18—19.
4. Смолага В. К., Шаевич Я. Е., Гольдфельд И. Я. Ресурсосберегающая технология инженерных изысканий//Проектирование и инженерные изыскания. 1984. № 5. С. 32—33.
5. Хуртин А. Н. Прогноз деформации основания гидротехнических сооружений и мелиоративных систем на лессовых просадочных породах//Экспресс-информация ЦБНТИ Минводхоза СССР. Сер. 9. Вып. 6. М., 1983. С. 1—5.

УДК 624.131.4

ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е. А., КАЛАЧЕВ В. Я., ТРОФИМОВ В. Т.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТИКСОТРОПНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Исследование закономерностей поведения грунтов под действием динамических нагрузок — актуальная проблема грунтоведения, имеющая непосредственное отношение к территориям широкого распространения слабых грунтов. Именно к таким территориям относятся центральные и северные районы Западно-Сибирской плиты, где на слабых песчано-глинистых водонасыщенных отложениях преимущественно четвертичного возраста возводятся и действуют крупнейшие нефте- и газодобывающие комплексы, инженерные сооружения которых передают различные по интенсивности динамические нагрузки на грунты основания. Между тем тиксотропные свойства таких грунтов изучены слабо [1, 5, 9, 16], а для территории Среднего Приобья подобные данные еще недавно отсутствовали. В связи с этим нами были исследованы тиксотропные свойства глинистых грунтов этого района; некоторые полученные результаты уже обсуждались в печати [2, 15]. В ходе этих работ мы столкнулись с некоторыми трудностями методического плана, на которых считаем необходимым остановиться в настоящей статье.

Анализ существующих методов изучения тиксотропных свойств грунтов показывает, что до настоящего времени не разработано рационального общепринятого метода таких исследований. Это связано с недостаточной изученностью проблемы и разнообразием задач, которые возникают в связи с проявлением грунтами тиксотропных свойств. Многие применяющиеся раньше способы и показатели не отвечают современным требованиям и практически вышли из употребления. Слабее всего разработаны методы изучения природных глинистых грунтов ненарушенного сложения. Ни один из них не позволяет изучать тиксотропные превращения в чистом виде, без дополнительного разрушения структуры грунта деформированием или внедрением различных инденторов и датчиков.

В целом такие исследования основаны на экспериментах, проводимых по следующей схеме: 1) определение прочностных показателей образца естественного или нарушенного сложения любым методом (микрокрыльчаткой, методом сдвига, внедрением индентора и т. п.); 2) передача на образец динамического воздействия; 3) повторное определение тех же показателей. Основным достоинством таких испытаний является возможность прямого определения прочностных характеристик грунта ненарушенного сложения — максимального и остаточного касательного напряжения, сцепления. Однако такая схема обладает рядом методических недостатков. С одной стороны, часто бывает невозможно определить прочность грунта в процессе динамического воздействия, в связи с чем может возникнуть неоднозначность получаемых результатов из-за недоучета изменений, происходящих в грунте после снятия динамического воздействия. С другой стороны, как уже отмечалось выше, дополнительное локальное нарушение структуры грунта при внедрении в него измерительных зондов, инденторов и др. приводит к некоторому искажению получаемых результатов. В связи с этим наиболее перспективным

следует считать метод так называемого неразрушающего контроля прочности, суть которого сводится к определению изменений состояния и свойств грунта при динамическом воздействии без применения инденторов или зондов. Достоинством этого метода является возможность непрерывного наблюдения на одном образце изменения состояния грунта до и во время динамического воздействия, а также через любые интервалы времени после его прекращения. Однако ввиду того, что при этом используются волновые явления (например, ультразвук), для получения тех же прочностных характеристик в привычных единицах необходимо иметь корреляционные зависимости, связывающие их с характеристиками волн. Исходя из всего сказанного, нами был сделан вывод о целесообразности комплексирования методики прямого определения прочности грунта до и после динамического воздействия на вибродвиговой установке с методом неразрушающего контроля и проведением параллельных экспериментов на одних и тех же грунтах при одинаковых параметрах воздействия.

**Методика экспериментальных исследований.** Предлагаемый метод неразрушающего контроля прочности глинистых грунтов основан на представлении о том, что в результате разрушения контактов между частицами грунта, перехода части связанный воды в свободную, изменения пористости и структурной перестройки при разупрочнении и обратных процессов после прекращения динамического воздействия должны изменяться и такие величины, как скорость, амплитуда и затухание ультразвуковой волны, пропускаемой через образец. В таком случае можно осуществлять непрерывный контроль за изменением одного или нескольких параметров волны при динамическом воздействии на грунт и после его прекращения. Это позволяет косвенно оценить степень разупрочнения и восстановления прочности, а также ход всего процесса в целом. В случае получения корреляционной зависимости между прочностными показателями грунта и соответствующими характеристиками ультразвуковой волны можно определить изменения прочности грунта при вибрации и после ее прекращения без дополнительных нарушений структуры грунта и, кроме того, проследить весь процесс тиксотропного разупрочнения и упрочнения на одном и том же образце, что даст более корректную картину.

В качестве прочностной характеристики грунта нами было выбрано максимальное касательное напряжение, определяемое с помощью описанной нами ранее вибродвиговой установки [16]. В качестве характеристики упругих ультразвуковых колебаний была выбрана скорость продольных волн как наиболее распространенный и просто определяемый параметр. Поскольку распространение упругих колебаний в среде от точки к точке происходит с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, мы рассчитывали, что изменения, происходящие при тиксотропных превращениях в глинистом грунте, отразятся прежде всего на скорости ультразвуковой волны, пропускаемой через образец.

Из анализа литературных данных по методам неразрушающего контроля свойств (например, прочности) дисперсных систем (грунтов, бетонных смесей и др.), и в частности по использованию для этих целей акустических эффектов, можно сделать следующие выводы. С одной стороны, в отечественной и зарубежной литературе не описаны методы неразрушающего контроля и соответствующие им устройства, позволяющие качественно или количественно охарактеризовать как глубину тиксотропного разупрочнения, так и степень восстановления прочности природных глинистых грунтов после динамического воздействия. Однако, с другой стороны, материалы, опубликованные советскими и зарубежными исследователями, авторские свидетельства и патенты [4, 12, 18 и др.] свидетельствуют о возможности использования параметров акустических колебаний, и в частности скорости ультразвука, для изучения изменений,

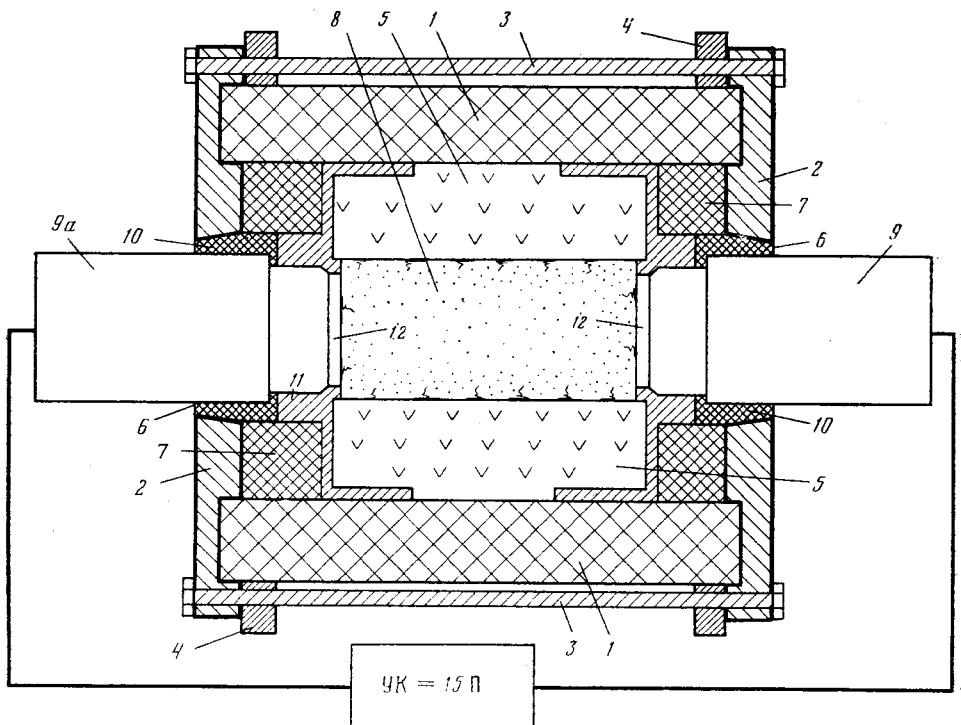


Рис. 1. Устройство для неразрушающего контроля прочности дисперсных горных пород

происходящих в природных глинистых грунтах в ходе тиксотропных превращений, при условии получения надежной корреляционной зависимости, связывающей указанные параметры с прочностными характеристиками грунта.

Для реализации этого предположения необходимо было сконструировать и изготовить устройство, позволяющее определять изменения скорости ультразвука в образце глинистого грунта при одновременном воздействии на него механической вибрации, исключив при этом возможные акустические помехи и дополнительные нарушения структуры грунта различными датчиками.

С этой целью нами было сконструировано устройство для неразрушающего контроля прочности дисперсных горных пород (рис. 1). Устройство состоит из корпуса 1, представляющего собой полый цилиндр, выполненный из плотной резины для улучшения акустической изоляции образца, и снабжено двумя торцевыми фланцами 2 с коническими отверстиями 6. Внутри корпуса находится дополнительная емкость 5, выполненная из акустического изолатора — пенопласта, в которой размещается испытуемый образец грунта 8. Излучатель 9 и приемный датчик 9а расположены так, что весь испытуемый образец находится между ними, а расстояние между датчиками фиксируется с помощью торцевых фланцев, снабженных эластичными прокладками из губчатой резины 7 и 10 и тягами 3 с ограничителями 4. Датчики жестко (на резьбе) закрепляются в муфтах 11, запрессованных между корпусом 1 и внутренней емкостью 5. Для повышения надежности акустического контакта по грубообработанной поверхности образца излучающий и приемный электроакустические пьезопреобразователи снабжены полиуретановой пленкой 12. Кроме того, излучающая и приемная поверхности датчиков изолированы от их корпусов. Как показали контрольные испы-

тания, затухание волновых помех в обход образца настолько велико, что они не регистрируются приемным датчиком. Таким образом, введение дополнительной емкости из акустического изолятора и эластичных прокладок обеспечивает регистрацию скорости волны, прошедшей через образец. Из-за большого затухания в образце глинистого грунта стоячая волна не может образоваться.

Ход опыта состоит в следующем. Специальным кольцом из монолита вырезается образец грунта ненарушенного сложения диаметром 30 и длиной 70 мм. С помощью несложного приспособления он прямо из кольца вводится в камеру внутренней емкости и поджимается датчиками; все устройство крепится на платформе вибратора. Затем определяется время прохождения ультразвуковых волн в покое, измерение осуществляется прибором УК-15П. Он представляет собой электронно-акустическое устройство, позволяющее с высокой точностью (предел допускаемой относительной погрешности измерения времени распространения ультразвука, включая систематическую и случайную составляющие, не более 1%) измерять время, за которое передний фронт ультразвукового импульса проходит известную базу в материале образца, на основании чего рассчитывается скорость распространения волн. Для измерения времени прохождения ультразвуковых колебаний в образце в приборе реализовано устройство помехозащиты, работающее при значительном уровне помех, что обеспечивается взаимокорреляционным анализом принятого ультразвукового сигнала. Диапазон измерения времени распространения ультразвуковых колебаний от 20 до 10 000 мкс, рабочая частота преобразователя ультразвука составляет  $60 \pm 18$  кГц [13].

Описанное устройство вместе с грунтом подвергается гармонической вибрации с заданными параметрами. Непосредственно в процессе вибрации продолжается наблюдение за изменением времени прохождения ультразвука. Вибрация не искажает получаемый результат благодаря помехозащищенности прибора. Изменение времени распространения ультразвука продолжается затем в момент выключения вибрации и через любые интервалы времени после ее прекращения. Таким образом, мы можем судить о наличии и величине «мгновенного» и последующего тиксотропного упрочнения. Диапазон изменения частоты вибрации составлял в наших опытах 10—50 Гц, амплитуды — 0,1—1 мм.

В современной литературе приводятся данные о том, что ультразвук, действуя на водные дисперсии глинистых минералов, разрушает их коагуляционные структуры и способствует равномерному распределению водных оболочек. Такие опыты [8] проводились при очень высокой интенсивности ультразвукового воздействия (амплитуда переменного ультразвукового давления 6 атм, амплитуда ускорения частиц  $3,6 \cdot 10^6$  см/с<sup>2</sup>). В наших же экспериментах применялось очень слабое по сравнению с этим ультразвуковое воздействие (практически равное нулю). Электронно-микроскопические исследования и контрольные испытания образцов грунта, подвергнутых действию ультразвука в течение часа (что в 8—10 раз превышает общую продолжительность воздействия в течение всего опыта), показали, что при этом не наблюдается ни снижения их прочности, ни изменений скорости ультразвука, их микроагрегатного состава и микростроения.

**Характеристика грунтов, использованных в экспериментах.** Для экспериментальных исследований были отобраны образцы грунта ненарушенного сложения из толщ различного возраста и генезиса, широко распространенных в центральных районах Западной Сибири. Наиболее подробно были изучены верхнеплейстоценовые озерно-аллювиальные отложения, слагающие верхние части II, III, IV надпойменных уровней, а также голоценовые аллювиальные отложения поймы. Глубина отбора образцов составляла 0,9—10,0 м. Сведения об их составе и свойствах приведены в табл. 1. По дисперсности все изученные разности представляют

Таблица 1

## Состав и свойства изученных грунтов

Номер обнаруж.	Номер отвала, м	Прицентное содержание фракций диаметром, мм 0,05—0,001 ≤0,001	Название грунта по классификации Н. А. Качинского	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Влажность, %	Консистенция	Модуль сжатия, МПа	Срок службы, м/с для предельного напряжения 60 кг/см <sup>2</sup>						
				Безвоздушного прибоя	Сухого прибоя										
50/5		5,3—5,5	1	83	16	Суглинок тяжелый	1,68	1,44	50	48	30	36	Текущая	0,048	462
ДНС/4		6,7—7,0	4	81	15	Суглинок средний	1,68	1,28	52	31	25	33	Мягкопластичная	0,062	496
KHC-17	1a Q <sub>III</sub> <sup>2-3</sup>	9,7—10,0	26	70	4	Суглинок легкий	1,79	1,42	45	26	27	35	Твердая	0,074	510
60/1	1,7—2,0	3	85	12		Суглинок средний	1,84	1,38	46	33	21	31	Текущая	0,028	445
K248	5,7—6,0	1	88	11	To же		1,76	1,43	44	23	26	34	Твердая	0,044	450
26	2,2—2,4	2	72	26	»		1,84	1,47	44	25	20	27	Мягкопластичная	0,022	338
30	a Q <sub>III</sub> <sup>3-4</sup>	1,9—2,1	5	71	24	»	1,87	1,51	44	24	19	27	Тугопластичная	0,059	480
37	a Q <sub>IV</sub>	0,8—1,0	9	64	27	»	1,57	1,15	56	37	24	34	Текущая	0,025	353
40		2,0—2,2	—	84	16	»	1,87	1,46	49	28	20	25	То же	0,030	455
42	0,7—0,9	20	63	17		Суглинок тяжелый	1,60	1,48	55	36	21	31	»	0,019	310
27	1a Q <sub>III</sub> <sup>1</sup>	2,4—2,6	1	76	23	To же	1,88	1,50	43	25	19	26	Текущепластичная	0,057	474

собой суглинки — от легких до тяжелых, практически все их водно-физические свойства, за исключением естественной влажности, изменяются в очень узких пределах, лишь несколько меньшую плотность и большую пористость имеют пойменные отложения. Естественная влажность грунтов изменяется от 24 до 48%, а консистенция — от твердой до текучей, что важно учитывать для более корректного проведения корреляционного анализа между прочностными свойствами грунтов и скоростью ультразвука в них. Исходная прочность грунтов составляет от  $1,9 \cdot 10^{-2}$  до  $7,4 \cdot 10^{-2}$  МПа, снижаясь в отдельных случаях при динамическом воздействии до  $9 \cdot 10^{-3}$  МПа и возрастая при последующем упрочнении до  $9,8 \cdot 10^{-2}$  МПа, т. е. в 10 раз.

Все изученные разности грунтов практически однотипны по химико-минеральному составу. Их песчаная и пылеватая фракции представлены в основном кварцем и полевым шпатом, а в глинистой фракции преобладает гидрослюдя, в значительных количествах отмечается монтмориллонит, иногда содержится хлорит, галлуазит.

Грунты характеризуются преимущественно слабокислой и нейтральной реакцией среды, а слабощелочная ( $\text{pH}$  до 8) отмечается у некоторых образцов голоценовых пойменных и верхнеплейстоценовых озерно-аллювиальных отложений района Самотлорского месторождения. Какой-либо явной закономерности изменения содержания активного водорода в водных вытяжках с глубиной залегания грунтов не наблюдается. В целом, по результатам анализа водной вытяжки, исследованные грунты являются незасоленными, содержащими в основном ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$ , слабокарбонатными, с различным содержанием органического вещества (0—6,78%), снижающимся с глубиной.

Анализ микростроения, как правило, указывает на отсутствие выдержанной ориентации частиц, что подтверждается данными математической обработки микрофотографий с помощью ЭВМ. Коэффициент агрегированности частиц размером менее 0,005 мм составляет 2,0—6,0, а частиц размером менее 0,001 мм — от 1,0 до 26,0. По характеру связей выделяются грунты с цементационно-коагуляционным и пластифицированно-коагуляционным типом структуры (по И. М. Горьковой [3]).

**Полученные результаты и их обсуждение.** С целью получения надежной информации нами было проведено свыше 300 параллельных испытаний образцов грунта нарушенного и ненарушенного сложения методом неразрушающего контроля и на вибросдвиговой установке. Математическая обработка на ЭВМ полученных данных показала, что прочность грунта и скорость распространения в нем продольных ультразвуковых волн связаны между собой эмпирической зависимостью вида  $\tau = \exp(6,8 \cdot 10^{-3} V - 6,1)$ , где  $\tau$  — максимальное касательное напряжение, МПа,  $V$  — скорость ультразвука, м/с (рис. 2). Корреляционная связь между ними приближается к тесной (выборочный коэффициент корреляции  $r = 0,66$ ). Считается, что при наличии тесной связи выполняется условие  $0,7 \leq r \leq 0,9$ , однако не следует забывать, что коэффициент корреляции является эффективной мерой связи только в условиях линейной зависимости и его величина существенно зависит от того, насколько линии регрессии близки к прямым. Поэтому «даже при наличии строгой функциональной зависимости между переменными... величина коэффициента корреляции может оказаться значительно меньше единицы» [7, с. 157]. Мы же имеем экспоненциальную зависимость: при уменьшении прочности грунта закономерно снижается скорость ультразвука, а при прочности менее 0,010 МПа остается практически постоянной, достигая величины 290—300 м/с. Именно этот горизонтальный отрезок кривой и обусловливает несколько меньшее значение коэффициента корреляции.

Подчеркнем, что приведенная зависимость справедлива для верхнеплейстоценовых и голоценовых грунтов озерно-аллювиального и аллювиального генезиса, имеющих широкое распространение на территории

Среднего Приобья, и определяется особенностями их состава и строения (при ненарушенном сложении). Поэтому распространять ее на другие дисперсные грунты преждевременно. Принимая во внимание также то обстоятельство, что при прочности грунта менее 0,010 МПа скорость распространения ультразвука остается практически постоянной, можно было ожидать, что применение метода неразрушающего контроля для изучения тиксотропных свойств высоковлажных грунтовых паст невозможно. Это получило подтверждение в наших опытах: изменения в скорости ультразвука в пастах, по составу аналогичных тяжелому и сред-

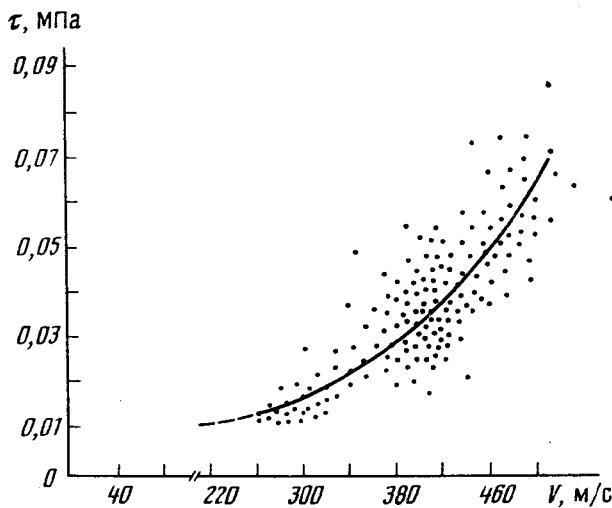


Рис. 2. Эмпирическая зависимость между прочностью грунта  $\tau$ , МПа, и скоростью распространения в нем ультразвука  $V$ , м/с

нему суглинкам при  $W = (1,5-2) W_L$ , до вибрации, во время нее и после прекращения воздействия были настолько незначительны, что практически не превышали предельной погрешности прибора. Однако иногда значения скорости ультразвука в пастах могут быть существенно выше 300 м/с и достигать 420 м/с, что объясняется утратой грунтом естественных особенностей строения и практически полным заполнением пор водой (очевидно, при безграничном увеличении влажности пасты скорость ультразвука стремится к своему значению для чистой воды). Кроме того, может наблюдаться существенное увеличение акустической проводимости, связанное с некоторым отслаиванием жидкой фазы. Все это еще раз подтверждает обоснованность нежелательности использования полученной корреляционной зависимости для грунтов с другим составом, строением и свойствами.

Один из наиболее важных выводов, который можно сделать по результатам проведенного корреляционного анализа, заключается в принципиальной возможности и целесообразности применения ультразвукового метода неразрушающего контроля для изучения тиксотропных изменений в дисперсных глинистых грунтах.

Проведенные нами исследования показали, что при разупрочнении грунта скорость распространения в нем ультразвука уменьшается, а при последующем упрочнении увеличивается, в связи с чем кривые изменения прочности и скорости при тиксотропных превращениях обычно сходны между собой (рис. 3). Однако в большинстве случаев отмечается сравнительно небольшое изменение скорости ультразвука в процессе разупрочнения грунта ( $-\Delta V = 1-20$  м/с, или 5% исходной), значительно уступающее по абсолютной величине ее увеличению при последующем уп-

рочнении ( $+\Delta V = 21-67$  м/с, или 11—28% исходной, в отдельных случаях до 39%). При разупрочнении прочность грунта снижается на 7—61%, а в процессе упрочнения может на 15—33% превысить исходную. Особенности изменения скорости ультразвука связаны с существенной структурной перестройкой грунта, на которой мы подробно остановимся несколько позже. Прежде рассмотрим некоторые особенности тиксотропных изменений в природных глинистых грунтах, которые не полностью соответствуют представлениям, разработанным главным образом для модельных систем — паст, супензий и т. д.

$V$ , м/с  $\tau$ , МПа

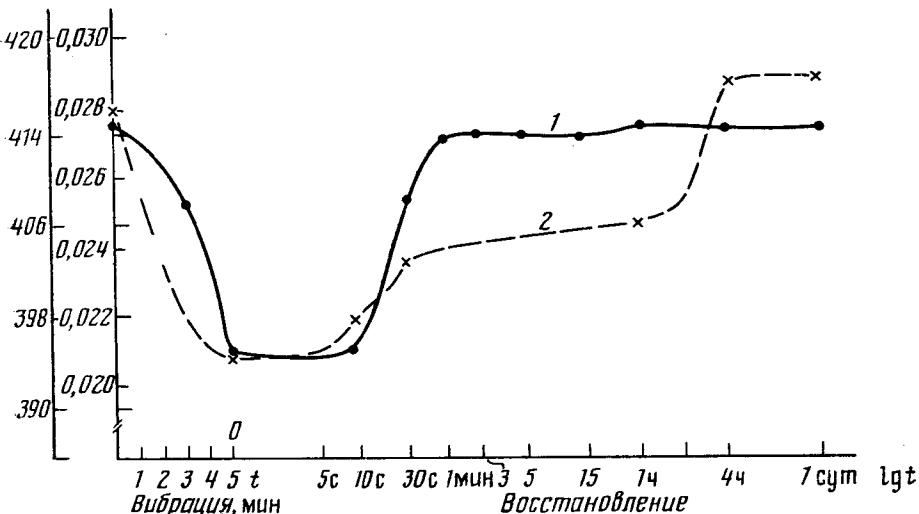


Рис. 3. Кривые тиксотропных изменений среднего суглинка ( $W=33\%$ ) по данным: 1 — определение прочности  $\tau$ , МПа; 2 — ультразвуковых испытаний  $V$ , м/с, при гармонической вибрации с амплитудой 1 мм и частотой 50 Гц

С помощью обоих методов получено, что в природных глинистых грунтах различной влажности так называемое «мгновенное» упрочнение практически отсутствует и первые регистрируемые изменения в образце происходят через 5—12 с после снятия вибраций, прирост же прочности при этом составляет не более 5%, а скорость ультразвука практически не меняется. Более того, в некоторых глинистых грунтах в силу значительной инерции тяжелых частиц может даже иметь место дополнительное «инерционное» снижение прочности в первые секунды после вибрационного воздействия, если продолжительность последнего была недостаточной для максимально возможного разрушения структуры (рис. 4). «Инерционное» снижение прочности в ряде случаев фиксируется по дальнейшему уменьшению скорости ультразвука (рис. 4, б), обычно нечувствительной к малым изменениям прочности, что свидетельствует о продолжающихся разрушениях структуры во всем объеме образца, а не в его локальных зонах.

Продолжительность последующего упрочнения грунта не зависит от его влажности и дисперсности (для описываемых суглинков) и составляет первые сутки. При этом наибольший прирост прочности чаще всего отмечается в течение первых 3—10 мин после снятия вибрации, а наибольший прирост скорости обычно наблюдается через 4—6 ч, в отдельных случаях — в первые минуты после прекращения воздействия (рис. 4).

К концу восстановления прочность природных грунтов при любых параметрах вибрации для всех изученных образцов, за редким исключением, превышает исходную на 6—25%. Это обстоятельство связано преж-

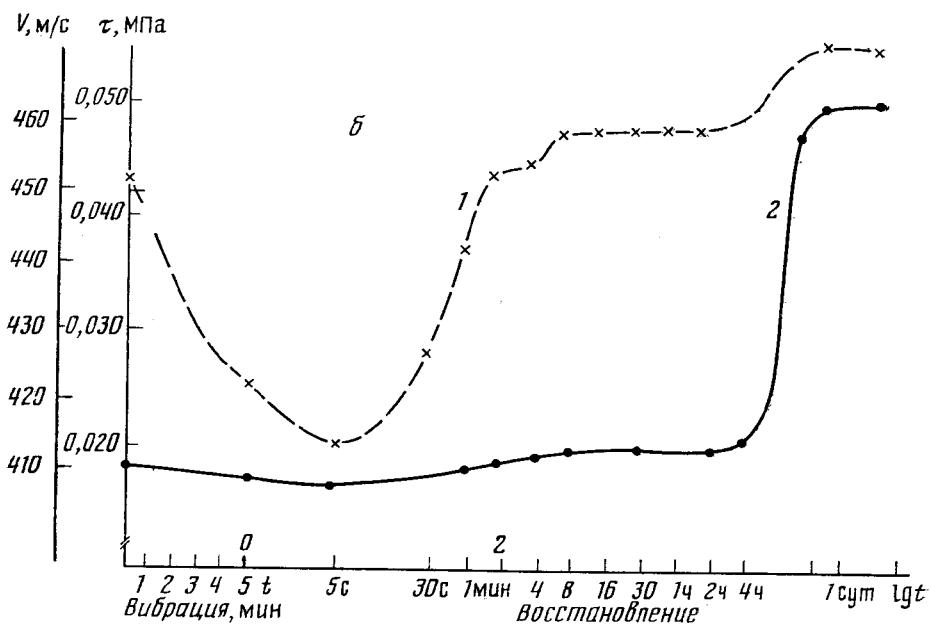
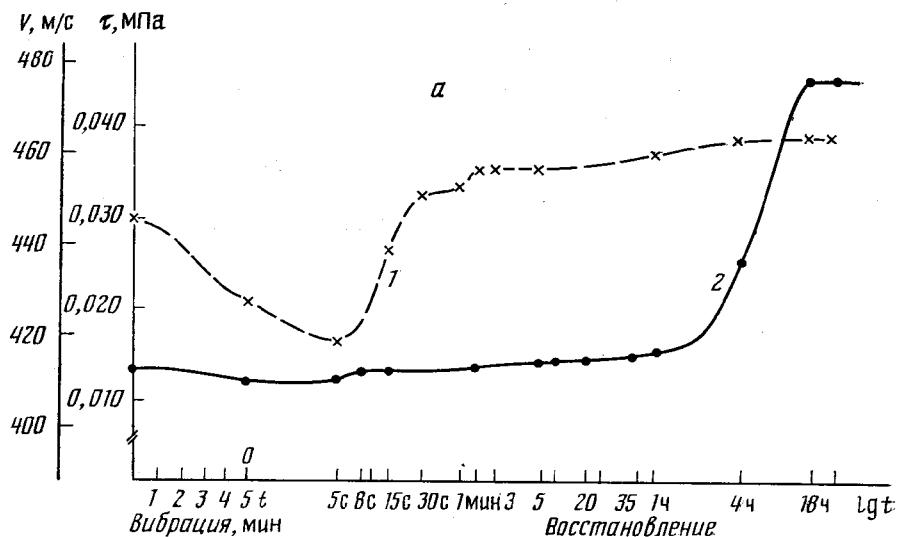


Рис. 4. Кривые тиксотропных изменений: а — среднего суглинка ( $W=28\%$ ); б — тяжелого суглинка ( $W=28\%$ ) по данным: 1 — определения прочности ( $\tau$ , МПа); 2 — ультразвуковых испытаний ( $V$ , м/с) при гармонической вибрации с амплитудой 1 мм и частотой 20 Гц

де всего с тем, что природные грунты, как справедливо отмечал К. А. Кожбаев [6], не являются идеально-тиксотропными системами, поскольку наряду с близкими и дальними коагуляционными в них существуют и контакты других типов — переходные (точечные) и фазовые, о чем свидетельствуют и выделенные выше типы структур. Однако ошибочно делать вывод о том, что конечная прочность восстановленного природного грунта будет всегда несколько меньше его исходной прочности, ибо происходящие при его разупрочнении необратимые изменения нельзя сводить лишь к переходу разрушенных точечных и, возможно, фазовых контактов в коагуляционные, а также для супесей к их уплотнению в результате частичного отжима поровой влаги [6, 10].

На наш взгляд, при объяснении особенностей разупрочнения и особенно упрочнения природных глинистых грунтов различной дисперсности необходимо иметь в виду и некоторые другие процессы. Прежде всего нужно учитывать возможность некоторого уплотнения грунта в процессе вибрации, особенно при виброударном режиме, что часто и наблюдалось в наших опытах. Последнее обстоятельство связано с тем, что такой режим следует рассматривать как воздействие совокупности простых гармонических колебаний (поличастотный режим [11, 14]). Введение второй, более высокой частоты значительно повышает степень уплотнения, так как высокочастотные колебания, накладываемые на низкочастотные, затухают незначительно в пределах ограниченной мощности уплотняемого слоя, вследствие чего их действие весьма эффективно [17].

Разрушение структуры при импульсной периодической вибрации более полное, чем при гармонической, потому что виброударный режим характеризуется резким скачком ускорения в узком промежутке времени (около 0,0015 с). Между тем отжима влаги при таком уплотнении (кроме отдельных случаев) обычно не происходило, а выступающая на поверхности образца влага вместе со взвешенными в ней тонкодисперсными частицами снова связывалась грунтом, как правило, в течение первых минут упрочнения в обстановке 100%-ной упругости водяных паров окружающей среды. Таким образом, многие природные глинистые грунты при достаточно интенсивном вибрационном воздействии в принципе могут в некоторой мере уплотняться без отжима поровой влаги, которая, очевидно, имеет возможность полностью перераспределиться в условиях новой структуры благодаря увеличению активной свободной поверхности частиц грунта при вибрации, переходу контактов одного типа в другой, освобождению защемленного воздуха (особенно при разжижении образца) и неполному водонасыщению исходного грунта.

Следует отметить зафиксированное нами изменение микроагрегатного состава при разупрочнении и упрочнении изученных грунтов. На примере трех образцов (табл. 2) видно, что при вибрации происходит разрушение крупнопылеватых агрегатов (фракция 0,1—0,05 мм) на более мелкие (фракция 0,05—0,01 мм). При импульсной вибрации этот процесс идет более интенсивно (обр. 33). В отдельных случаях может увеличиваться содержание глинистых частиц, не связанных в более крупные микроагрегаты (обр. 57/1). В целом же при вибрации закономерно снижается степень агрегированности глинистых частиц (фракция менее 0,001 мм) по сравнению с исходным грунтом. В дальнейшем, в ходе упрочнения наблюдается обратный процесс агрегации более мелких частиц (обр. 69), не приводящий, однако, к полному восстановлению соотношения в содержании различных по размеру микроагрегатов<sup>1</sup>.

В связи с наблюдавшимся увеличением прочности природного грунта до значений, превышающих исходное, нельзя также не учитывать возможности эффекта, который в виброреологии получил название «вибрационного упрочнения». Суть его сводится к следующему. Вибрация приводит к разрушению структуры, переориентации частиц и образованию относительно более прочных коагуляционных контактов по наиболее энергетически активным, лиофобным участкам поверхностей частиц. Вероятность такого взаимодействия частиц в случае преодоления ими энергетического барьера возрастает при их взаимном перемещении во время вибрации. После прекращения вибрации эти процессы приводят к

<sup>1</sup> Во время вибрации непосредственно из обоймы отбиралась проба грунта и немедленно помещалась в сосуд с водой, масса которого (вместе с жидкостью) была определена заранее, после чего производилось их взвешивание. Навеска определялась по разнице этих двух определений с учетом влажности грунта. Дальнейший ход микроагрегатного анализа осуществлялся по стандартной методике. Аналогичным образом проводился микроагрегатный анализ и через заданные интервалы времени после прекращения вибраций.

Таблица 2

## Изменения микроагрегатного состава глинистых грунтов при тиксотропных превращениях

Номер образца, состав, возраст, генезис	Глубина отбора, м	Влажность, %	Микроагрегатный состав						Коэффициент агрегирования частиц, мм			Условия опыта			Параметр вибрации		
			процентное содержание фракций диаметром, мм			<0,001			<0,005			<0,001					
			0,5—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01	<0,01	0,01—0,005	0,005—0,001	<0,001	0,005—0,001	<0,005	<0,001	0,005—0,001	<0,005	<0,001	A, мм	f, Гц
Суглинок легкий 1a Q <sub>III</sub> <sup>2-3</sup>	2,4—2,6	33	1	51	30	18	7	7	4	2,2	4,8	Без вибрации	1,5	10	Гармонический	1,5	15
			1	14	67	18	7	7	4	2,2	4,8	При вибрации	1,5	25			
Суглинок средний 1a Q <sub>III</sub> <sup>2-3</sup>	1,7—2,0	57/1	—	68	31	40	14	7	1,1	2,7	»	»	1,5	25	Импульсный	»	»
			—	12	65	23	6	8	9	1,4	2,4	»	1,5	25			
Суглинок легкий 1a Q <sub>III</sub> <sup>1</sup>	5,0—5,2	69	—	6	70	24	11	10	3	1,85	3,3	Без вибрации	1,0	15	Гармонический	1,0	20
			—	—	63	37	14	13	10	1,04	1,00	При вибрации	1,0	20			
Суглинок легкий 1a Q <sub>III</sub> <sup>1</sup>	5,0—5,2	33	—	10	70	20	9	9	2	1,6	6,0	Без вибрации	1,0	20	»	»	»
			—	5	78	17	8	5	4	2,0	3,0	При вибрации	1,0	20			
Суглинок легкий 1a Q <sub>III</sub> <sup>1</sup>	5,0—5,2	1a Q <sub>III</sub> <sup>1</sup>	—	7	74	19	7	7	5	1,5	1,7	Через 35 мин после вибрации	1,0	20	»	»	»

ускоренному тиксотропному восстановлению структуры до уровня, превышающего равновесный до вибрации (в зоне установившегося течения). Причем этот эффект проявляется тем ярче, чем сильнее разрушена структура [17].

Наиболее существенно на скорость распространения ультразвука в грунте влияют, по нашему мнению, изменения в процессе тиксотропных превращений степени заполнения пор водой и самого порового пространства. Это было подтверждено данными, полученными нами при исследовании серии образцов с помощью сканирующего электронного микроскопа. В качестве примера рассмотрим изменение микростроения среднего суглинка с естественной влажностью 33%. По данным обработки изображений микростроения на ЭВМ, в исходном грунте наряду с мелкими порами со средним диаметром 2,60 мкм выделяются и значительно более крупные — со средним диаметром 9—30 мкм, составляющие значительную часть общего объема пор (до 30% и выше). При вибрации, как гармонической, так и импульсной, вследствие разрушения структуры крупные поры исчезают и наблюдается более равномерное распределение пор по размеру. Средний диаметр пор составляет для приведенного образца 3,46 мкм, что и отражает процесс выравнивания пор по размерам при вибрации. Именно это обстоятельство обусловливает, по нашему мнению, незначительное уменьшение скорости ультразвука при разупрочнении грунта. Важно отметить, что в первые 5 с после прекращения вибровоздействия отмечается даже некоторое увеличение среднего диаметра пор (до 3,83 мкм) по сравнению с моментом вибрации.

В процессе последующего тиксотропного упрочнения грунта происходят дальнейшие изменения порового пространства (хотя общая пористость, особенно при гармонической вибрации, может меняться незначительно). Прежде всего уменьшается средний диаметр пор; так, через 15 мин после вибрации он составлял уже 3,18 мкм, а к концу упрочнения (через сутки) всего 1,37—2,06 мкм (рис. 5). Привиброударном режиме происходят аналогичные изменения, часто на фоне уменьшения общей пористости. Образовавшаяся структура акустически «плотнее» исходной, крупные поры отсутствуют. Именно по этой причине происходит часто существенное увеличение скорости распространения ультразвука в грунте при упрочнении.

Определенное влияние на акустическую проводимость грунта может оказывать также снижение относительного количества связанных пор при восстановлении (в рассматриваемом случае от 28 до 18%), а также изменение степени заполнения пор водой и удаление из них защемленного воздуха при вибрации и в ходе последующей структурной перестройки, так как коэффициент поглощения ультразвука в воздухе приблизительно в 10<sup>3</sup> раз больше, чем в воде. Удаление же воздуха из пор наблюдалось нами визуально в ходе эксперимента (при разжижении образца), кроме того, в электронном микроскопе на поверхности образцов были хорошо видны следы от пузырьков воздуха.

Микростроение природных глинистых грунтов в исходном состоянии, как правило, весьма беспорядочно, что чрезвычайно затрудняет анализ изображений. Наиболее отчетливо разупрочнение грунта видно при его разжижении, т. е. при наиболее полном разрушении структуры (рис. 6, а, б). На некоторых снимках довольно хорошо видно также отсутствие

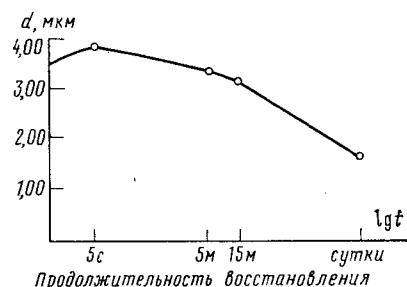


Рис. 5. Изменение среднего диаметра пор  $d$  среднего суглинка ( $W = 33\%$ ) при восстановлении после гармонической вибрации с амплитудой 1 мм и частотой 20 Гц

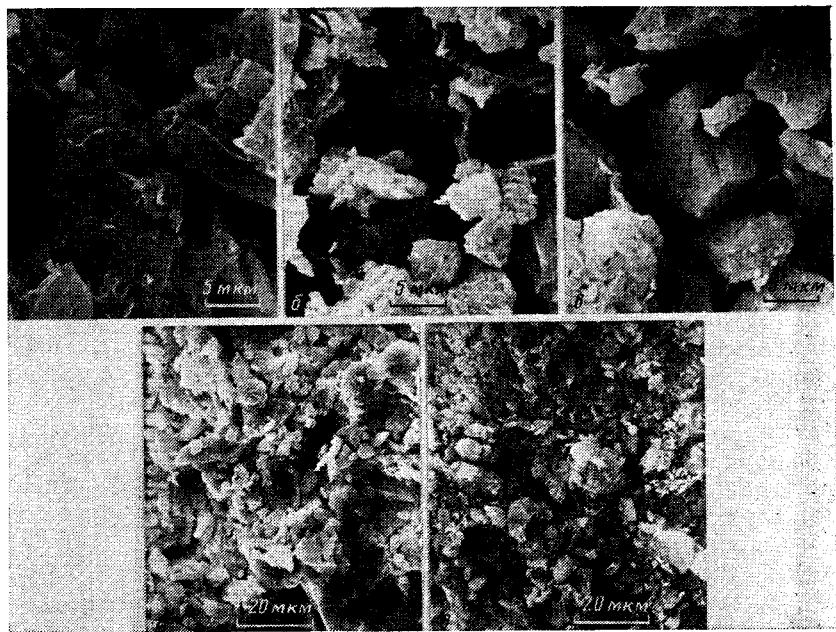


Рис. 6. Микростроение различных грунтов при тиксотропных изменениях:  
а — легкий суглинок ( $W=28\%$ ) в исходном состоянии; б — то же при импульсной вибрации с частотой 20 Гц и амплитудой 1 мм; в — тяжелого суглинка ( $W=44\%$ ) через 5 с после выключения гармонической вибрации с частотой 20 Гц, амплитудой 1 мм; г — среднего суглинка ( $W=24\%$ ) в исходном состоянии; д — то же при импульсной вибрации с частотой 20 Гц и амплитудой 1 мм

«мгновенного» упрочнения в течение первых 5 с после снятия вибрации: крупные частицы еще разобщены и находятся как бы во взвешенном состоянии вместе с приставшими к ним более мелкими частицами, препятствуя восстановлению структуры грунта. Этот эффект виден особенно отчетливо, когда края крупных частиц не закрыты более мелкими (рис. 6, в). Кроме того, во многих случаях на снимках достаточно четко видно существенное повышение дисперсности грунта вследствие разрушения части микроагрегатов, особенно при импульсном режиме вибрации (рис. 6, г, д). Нужно отметить, что в процессе упрочнения грунта в результате существенной структурной перестройки возникновения какой-либо преимущественной ориентации частиц и их микроагрегатов не происходит. Выравнивание же пор по размерам, а также увеличение числа контактов в совокупности с описанными выше процессами часто приводят к образованию более равномерной и устойчивой к динамическому воздействию структуры, отличающейся от исходной более высокой акустической проводимостью и прочностью.

### Выводы

1. В результате проведенных исследований установлена принципиальная возможность и целесообразность использования ультразвукового метода неразрушающего контроля для исследования тиксотропных превращений в природных глинистых грунтах и получена корреляционная зависимость, связывающая прочность изученных грунтов со скоростью распространения в них продольных ультразвуковых волн.

2. В ходе процессов разупрочнения и упрочнения наблюдается соответствующее им снижение и увеличение скорости ультразвука, однако

ее изменения в первом случае невелики по сравнению с таковыми при упрочнении. Это объясняется специфическими особенностями изменения порового пространства природных грунтов, а также возможными изменениями соотношения твердой, жидкой и газообразной компонент грунта, что было установлено электронно-микроскопическими исследованиями.

3. В ходе разупрочнения под действием вибрации происходит не только разрыв связей между частицами и микроагрегатами, но и разрушение последних, что особенно заметно сказывается на крупнопылеватых агрегатах.

4. С помощью метода неразрушающего контроля и на вибросдвиговой установке установлено отсутствие «мгновенного» упрочнения в природных глинистых грунтах, а в ряде случаев отмечается даже некоторое увеличение степени разупрочнения грунта в первые 5 с после прекращения вибрации в силу значительной инерции тяжелых частиц и агрегатов, что также подтверждается данными электронно-микроскопических исследований.

5. Некоторое увеличение прочности природных грунтов по сравнению с исходной, наблюдающееся, как правило, в конце упрочнения, объясняется возможным их частичным уплотнением под действием вибрации, особенно импульсной, без изменения абсолютной влажности, изменением порового пространства и увеличением числа контактов, а также возможным эффектом «вибрационного упрочнения».

6. Механизм процессов разупрочнения и упрочнения природных грунтов под действием вибрации не полностью соответствуют сложившимся на сегодняшний день представлениям о тиксотропии, в связи с чем применительно к ним правильнее говорить о квазитиксотропном разупрочнении и упрочнении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бочарова И. С., Горницкая Л. А., Зубкович Г. Г. Природа разжижения пылеватых грунтов севера Западной Сибири//Тр. ПНИИС. Т. 4. М., 1970. С. 299—345.
2. Вознесенский Е. А. Поведение глинистых грунтов центральных районов Западно-Сибирской плиты при динамическом воздействии//Тез. докл. Всесоюз. научно-практич. конф. «Повышение эффективности инженерных изысканий для строительства в нефтегазоносных районах Западной Сибири». Тюмень. 1983. С. 60—62.
3. Горькова И. М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород. М.: Наука, 1965. С. 19—24.
4. Гурвич В. И., Огородникова В. П., Шименевич Ю. С. Способ определения пористости горных пород. А. С. № 1116379 СССР. Б. И. 1984, № 36.
5. Зиангиров Р. С., Кутергин В. Н. Инженерно-геологический прогноз разупрочнения при вибрации связных грунтов севера Западной Сибири// Тез. докл. Всес. научно-практич. конф. «Повышение эффективности инженерных изысканий для строительства в нефтегазоносных районах Западной Сибири». Тюмень, 1983. С. 57—59.
6. Кожобаев К. А. Исследование природы тиксотропных явлений в глинистых грунтах. Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1977. 22 с.
7. Комаров И. С. Накопление и обработка информации при инженерно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1972. 294 с.
8. Круглицкий Н. Н., Симуров В. В., Овчаренко Ф. Д., Ничипоренко С. П. Действие ультразвуковых колебаний на коагуляционные структуры водных дисперсий глин// Сб. Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. С. 151—157.
9. Кутергин В. Н. Исследование закономерностей изменения прочности водонасыщенных связных грунтов при вибрации (на примере грунтов четвертичного возраста севера Западной Сибири). Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М.: ПНИИС. 1983. 25 с.
10. Николаева С. К. Исследование природы тиксотропных изменений в грунтах: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1982. 24 с.
11. Осмаков С. А., Савинов О. А. О движении вибратора, свободно опирающегося на упругий ограничитель//Изв. АН СССР. ОТН, Механика и машиностроение. 1960. № 3. С. 3—11.
12. Пименов В. В., Ногин С. И. Устройство для акустического испытания бетонной смеси. А. с. № 319893, СССР. Б. И. 1971. № 33.

13. Прибор ультразвуковой УК-15П. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1979. 84 с.
14. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. 344 с.
15. Трофимов В. Т., Вознесенский Е. А. Закономерности разупрочнения глинистых грунтов центральных районов Западно-Сибирской плиты при динамическом воздействии// Вест. МГУ. Сер. 4, Геология, 1985. № 1. С. 60—67.
16. Трофимов В. Т., Мартынов А. П. О плавунных и тиксотропных свойствах пылеватых пород слоя сезонного оттаивания полуострова Ямал//Природные условия Западной Сибири. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ. 1975. с. 263—272.
17. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 320 с.
18. Thornton A. A. et al. Method and apparatus for nondestructive testing of cement. UK patent № 2059588. 1981.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
21.XI.1985

УДК 624.131

ПЕЧЕРКИН А. И.

## К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУР ПОЛНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ

В районах, где тектоническая трещиноватость доступна непосредственному наблюдению, можно путем построения схем распределения трещин изучить структуру массива и выбрать наиболее благоприятные для инженерного использования участки. Изучать тектоническую трещиноватость, однако, не всегда можно. Тогда можно составить представление о структуре массива путем вычисления и построения схем напряжений, которые возникли в нем под действием тектонических сил. Основой для построения схемы должна служить история тектонических движений рассматриваемого района, а также форма и размеры тектонической структуры.

Для геосинклинальных областей характерна полная складчатость, образование которой связано с действием тангенциальных сжимающих усилий на горные массы [2]. Это приводит к нарушению напряженного состояния, создавшегося в процессе осадконакопления и диагенеза. Экспериментальные исследования механизма формирования подобных структур проводились В. В. Белоусовым и М. В. Гзовским [1] и другими.

Для расчета напряжений, возникающих при формировании тектонических структур полной складчатости, воспользуемся решением пространственной задачи по расчету нормальных и касательных напряжений и устойчивости тонких пластин при их изгибе [3, 5].

В качестве примера рассмотрим антиклиналь Ахштырь (Западный Кавказ). В структурном отношении она представляет собой складку длиной 12 250 и шириной 3250 м, сложенную известняками мелового возраста мощностью около 300 м (рис. 1). Рассматриваемую структуру можно считать симметричной, поэтому распределения напряжений и соответствующей им трещиноватости на противоположных крыльях складки идентичны. Поэтому далее будем рассматривать участок, включающий юго-восточное крыло антиклинали, ее присводовую часть и участки, приуроченные к южной короткой и восточной длинной полуосям (рис. 2).

Основываясь на взглядах В. В. Белоусова [12] и М. В. Гзовского [4], а также на результатах собственных исследований и наблюдений, автор следующим образом представляет историю развития описанной выше структуры. Условно ее можно разделить на два этапа, которые накладываются один на другой. На первом этапе под действием тангенциальных сжимающих нагрузок, перпендикулярных длинной оси структуры, массив приобрел одноосное напряженное состояние и соответствующую ему трещиноватость скальвания, ориентированную параллельно короткой оси структуры. При дальнейшем действии тангенциальных сжимающих нагрузок наблюдается изгибание структуры вдоль длинной оси. На изогнутой поверхности появляются касательные напряжения, за счет которых сформировались продольные трещины отрыва. С изгибанием структуры начинается второй этап ее развития. Горные породы подвергаются действию как тангенциальных сжимающих, так и вертикальных воздымывающих усилий. В результате толща приобретает трехосное напряженное

состояние и соответствующую ему трещиноватость, выраженную в системах трещин скальвания, которые секут длинную ось структуры под углом, близким к углу скальвания ( $\alpha$ ), и трещин отрыва, перпендикулярных трещинам скальвания [9]. Таким образом, сложному напряженному состоянию, имеющему место при формировании полной складчатости, должна соответствовать трещиноватость, включающая систему трещин скальвания, перпендикулярную длинной оси структуры, систему трещин отрыва, параллельную длинной оси структуры, систему трещин скальвания, пересекающую длинную ось структуры под углом, близким к углу скальвания, и субперпендикулярную ей систему трещин отрыва.

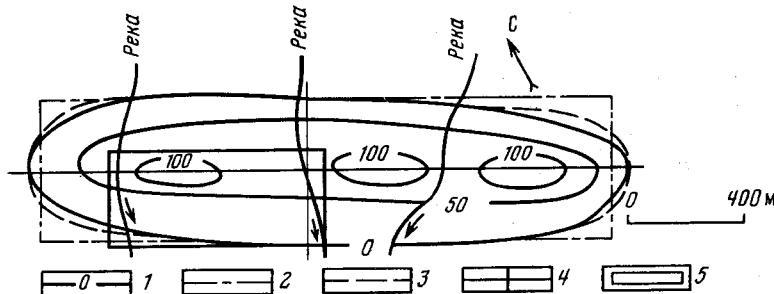


Рис. 1. Тектоноструктурная схема антиклинали Ахштырь: 1 — реальный контур структуры; 2 — контур, принятый для расчетов напряжений, возникающих при тангенциальном сжатии; 3 — то же, при нормальном воздымании; 4 — оси структуры; 5 — участок исследования трещиноватости

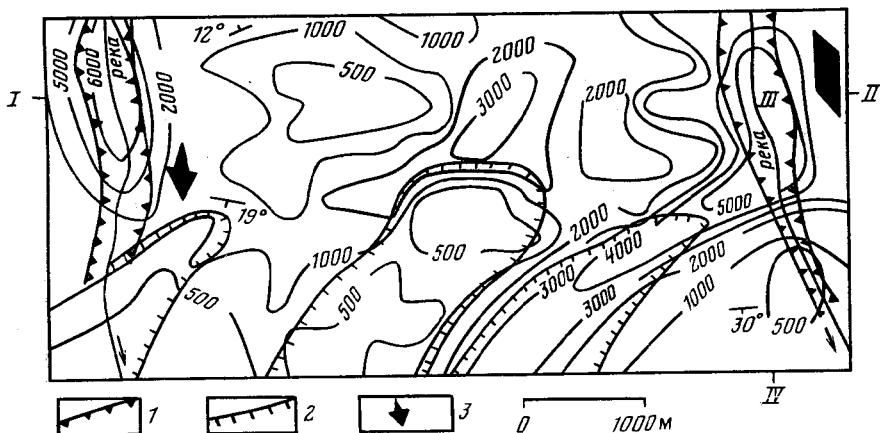


Рис. 2. Схема изолиний общей длины тектонических трещин на гектар поверхности на участке антиклинали Ахштырь: 1 — борта каньонов, 2 — контуры оврагов и балок, 3 — розы углов падения тектонических трещин

Основываясь на вышеизложенных представлениях о формировании напряженного состояния структуры и соответствующей ему трещиноватости, проведем расчет наибольших ( $\sigma_y$ ) и наименьших ( $\sigma_x$ ) нормальных и касательных ( $\tau_{xy}$ ) напряжений по следующей схеме.

В начале рассчитаем нормальные и касательные напряжения при действии на структуру тангенциальных сжимающих усилий. Затем произведем расчет напряженного состояния массива при действии на него вертикальных воздымающих усилий. И наконец, воспользуясь правилом сложения напряжений Мора [6], рассчитаем сложное напряженное состояние массива, возникшее при совместном действии тангенциального сжатия и нормального воздымания. При этом до начала тектонических движений, обусловивших формирование складки, толщу известняков бу-

дем рассматривать как пластину, близкую по своим очертаниям к эллипсу, сильно удлиненному по большой оси. Координатная плоскость  $XOY$  совпадает со срединной плоскостью пластины. Ось  $OY$  направлена вдоль короткой, а ось  $OX$  — вдоль длинной стороны структуры, ось  $OZ$  — вертикально вверх.

В начальном состоянии (сразу после седиментации и литификации осадка, до начала тектонических деформаций и растрескивания) толща пород рассматривается как сплошное изотропное тело. Наличие литогенетической трещиноватости не будет противоречить такому условию, так как по простиранию пласта она распространена относительно равномерно, а частота трещин зависит от его мощности. Для определенного стратиграфического горизонта эти параметры принимаются постоянными. Мощность рассматриваемой толщи известняков мала по сравнению с распространением их в плане, поэтому можно ввести нижеследующие допущения, позволяющие упростить вычисление.

1. При расчете напряженного состояния, вызванного тангенциальным сжатием, закрепление контура структуры принимается шарнирным, а при расчете напряжений, вызванных вертикальным воздыманием, — жестким.

2. Напряжения на контуре уравновешиваются внутренними напряжениями толщи, а после начала вертикальных деформаций всякие перемещения на контуре отсутствуют. Это условие позволяет пренебречь трением по плоскостям напластования слоистой толщи, которое может возникнуть при деформациях.

3. Точки срединной плоскости рассматриваемой толщи перемещаются только вертикально, так как при начале растрескивания горизонтальные перемещения отдельных блоков настолько малы, что ими можно пренебречь.

Расчет первого этапа растрескивания рассматриваемой структуры (действие тангенциального сжатия) производится вычислением напряжений в шарнирно опертой пластине, сжатой в одном направлении [3]. Толща пород представляется в виде прямоугольной пластины со сторонами  $a$  и  $b$ , равными соответственно короткой и длинной осям описываемой структуры, и толщиной  $h$ , равной мощности деформируемой толщи.

Рассечем срединную поверхность деформируемой пластины плоскостью, параллельной плоскости  $XZ$ . Так как прогибы малы, в сечении мы получим пологую кривую. Угол наклона касательной к ней равен

$$\theta_x = \frac{\partial \omega}{\partial X} . \quad (1)$$

Аналогично для сечения, параллельного плоскости  $YZ$

$$\theta_y = \frac{\partial \omega}{\partial Y} . \quad (2)$$

Тогда кривизны в сечениях, параллельных плоскостям  $XZ$  и  $YZ$ , будут равны

$$\kappa_x = \frac{\partial^2 \omega}{\partial X^2} , \quad (3)$$

$$\kappa_y = - \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2} . \quad (4)$$

Относя приращение угла  $\theta_x$  к приращению координаты  $Y$  (или наоборот), находим кручение срединной поверхности

$$\chi = - \frac{\partial^2 \omega}{\partial X \partial Y} . \quad (5)$$

Для пластины, стороны которой сравнимы по величине, функция прогиба имеет вид

$$\omega = f \sin \frac{m\pi X}{a} \sin \frac{n\pi Y}{b}, \quad (6)$$

где  $f$  — стрела прогиба,  $m$  и  $n$  — число полуволн по направлениям  $X$  и  $Y$ .

Антиклинальные структуры продольного сжатия вкрест простирания пластов обычно имеют один максимум изгиба (т. е.  $1/2$  волны), гребень которого определяет апикальную зону. Вследствие этого  $m=1$ , а максимальное значение  $m$  имеет при

$$m = \frac{a}{b}. \quad (7)$$

Для слоя, лежащего на расстоянии  $z$  от срединной поверхности пластины, деформациям соответствуют нормальные ( $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ) и касательные ( $\tau$ ) напряжения. Пользуясь законом Гука и пренебрегая напряжением  $\sigma_z$ , получим

$$\sigma_x = \frac{E_z}{(1 - v^2)} (\kappa_x + v \kappa_y), \quad (8)$$

$$\sigma_y = \frac{E_z}{(1 - v^2)} (\kappa_y + v \kappa_x), \quad (9)$$

$$\tau = \frac{E_z}{1 + v} \chi. \quad (10)$$

Для расчета напряжений на складках продольного сжатия составлена программа на языке ФОРТРАН-4 для ЭВМ ЕС-1020.

Результаты расчетов представлены на рис. 3,  $a$ , 4,  $a$ . На рис. 3,  $a$  изображена схема наибольшего ( $\sigma_y$ ) и наименьшего ( $\sigma_x$ ) нормальных напряжений, действующих по осям  $X$  и  $Y$  и определяющих направление трещин скальвания, формирующихся на первом этапе развития структуры. Среднее нормальное напряжение ( $\sigma_z$ ) действует по оси  $Z$  и обусловлено собственным весом пород. Трещины скальвания, образовавшиеся на этом этапе, имеют вертикальное падение, так как расположены перпендикулярно длинной оси структуры, вдоль которой изгибается рассматриваемая толща.

На схеме изолиний  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  видно, что они располагаются зонами, ограниченными изолиниями с нулевыми значениями напряжений. Эти зоны перпендикулярны длинной оси структуры. Максимальных значений напряжения достигают в центральных частях вышеупомянутых зон ( $\sigma_x = 0,03-0,04$ ,  $\sigma_y = 0,04-0,08$  Па). Следует отметить, что расположение зон концентрации нормальных напряжений в первом приближении соответствует расположению оврагов и балок на склонах и особенно на присводовой части структуры, а крайние восточная и западная зоны — каньонам рек.

Изолинии касательных напряжений (рис. 4,  $a$ ) также группируются в зоны, перпендикулярные оси структуры и ограниченные нулевыми значениями напряжений. Сопоставляя схемы распределения касательных и нормальных напряжений (рис. 3,  $a$ , 4,  $a$ ), следует отметить, что зоны концентрации первых приурочены к зонам отсутствия последних.

Для расчета напряжений, возникающих на втором этапе формирования структуры, воспользуемся задачей по вычислению нормальных и касательных напряжений при изгибе тонких пластин вертикальной нагрузкой [5]. Формулы и методика проведения расчетов изложены в работе [9].

Результаты расчетов представлены в виде схем изолиний нормальных (рис. 3,  $b$ ) и касательных (рис. 4,  $b$ ) напряжений. Трещины скаль-

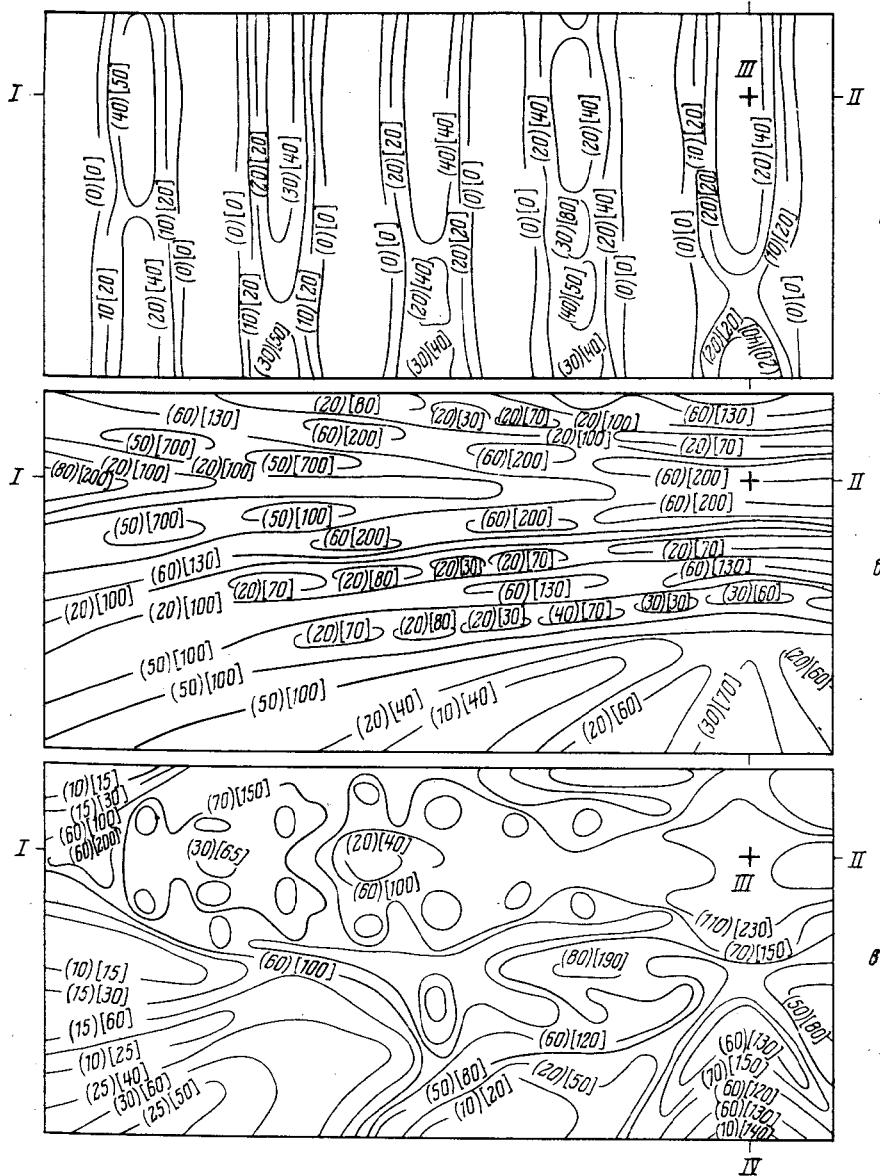


Рис. 3. Схемы изолиний нормальных напряжений ( $10^{-5}$  Па) юго-западного крыла антиклинали Ахштырь (в круглых скобках  $\sigma_x$ , в квадратных  $\sigma_y$ ): а — при действии тангенциального сжатия; б — при действии нормального воздымания; в — при совместном действии тангенциального сжатия и нормального воздымания

вания, обусловленные действием нормальных напряжений, будут ориентированы под острым углом к длинной оси структуры. За счет изгиба пластов падение трещин скальвания будет значительно отклоняться от вертикального, что наглядно подтверждается розами — диаграммами углов падения тектонических трещин, изображенными на рис. 2.

Анализируя схему изолиний  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , видим следующее.

1. Через центр структуры проходят изолинии с наибольшими значениями нормальных напряжений ( $\sigma_x > 0,06$ ,  $\sigma_y > 0,02$  Па), секущие тектоническую структуру по диагоналям под углом  $20^\circ$  к длинной оси. Угол наклона изолиний нормальных напряжений остается постоянным приблизительно до половины короткой оси структуры. Далее он увеличивается от  $30$  до  $50^\circ$ , и чем ближе располагаются изолинии к короткой оси

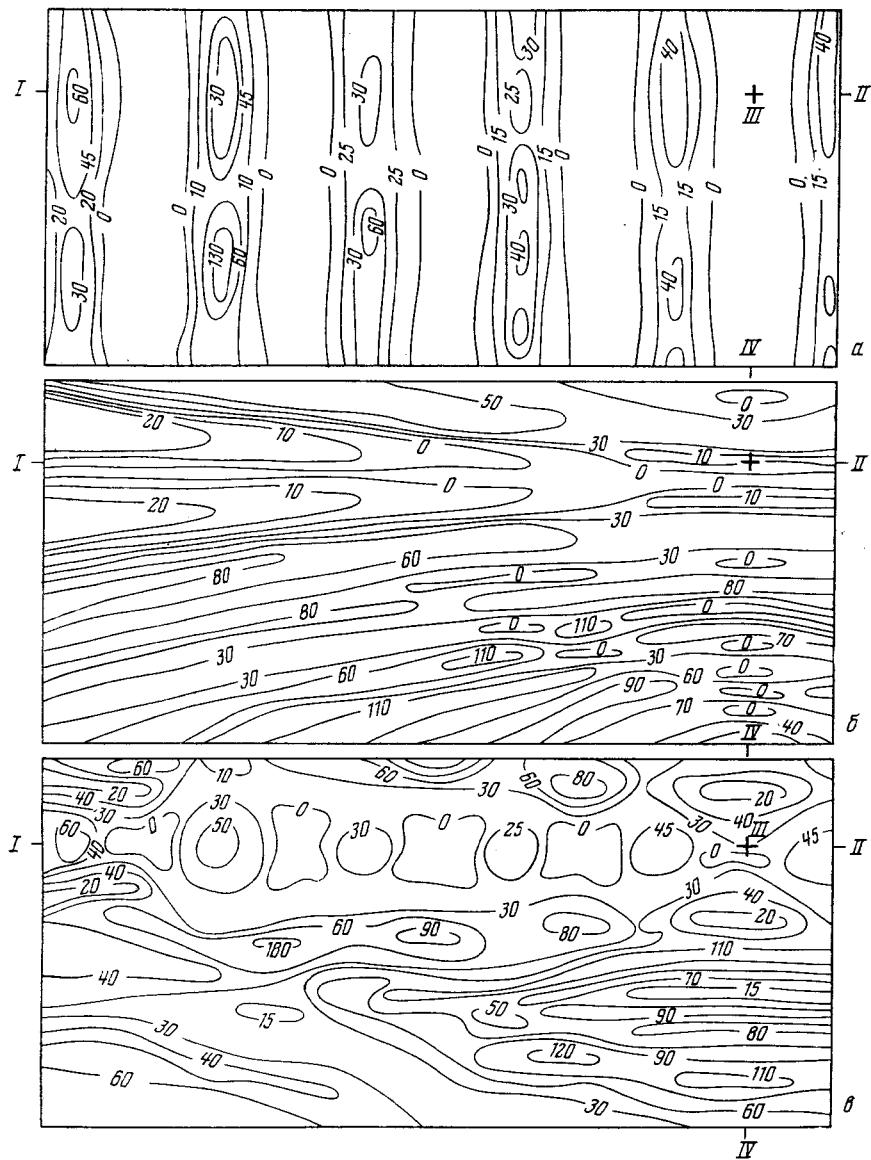


Рис. 4. Схема изолиний напряжений  $\tau_{xy}$  ( $10^{-5}$  Па) юго-западного крыла антиклинали Ахтыры: а — при действии тангенциального сжатия, б — при действии нормального воздымания, в — при совместном действии тангенциального сжатия и нормального воздымания

структурь, тем круче они наклонены по отношению к длинной оси. Угол наклона изолиний  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  постепенно увеличивается до  $25\text{--}30^\circ$  при движении от центра структуры вдоль ее длинной оси к периклинали.

2. Распределение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  вдоль короткой и длинной осей структуры характеризуется колебаниями их значений (рис. 5, в, г). Наибольшая амплитуда колебаний ( $\sigma_x$  0,025,  $\sigma_y$  до 0,15 Па) наблюдается в центре структуры, постепенно уменьшаясь к периферии. Массив оказался разбитым на зоны, простирание которых определяется направлением изолиний  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Границами зон служат изолинии с минимальными, а центральными частями — с максимальными значениями напряжений.

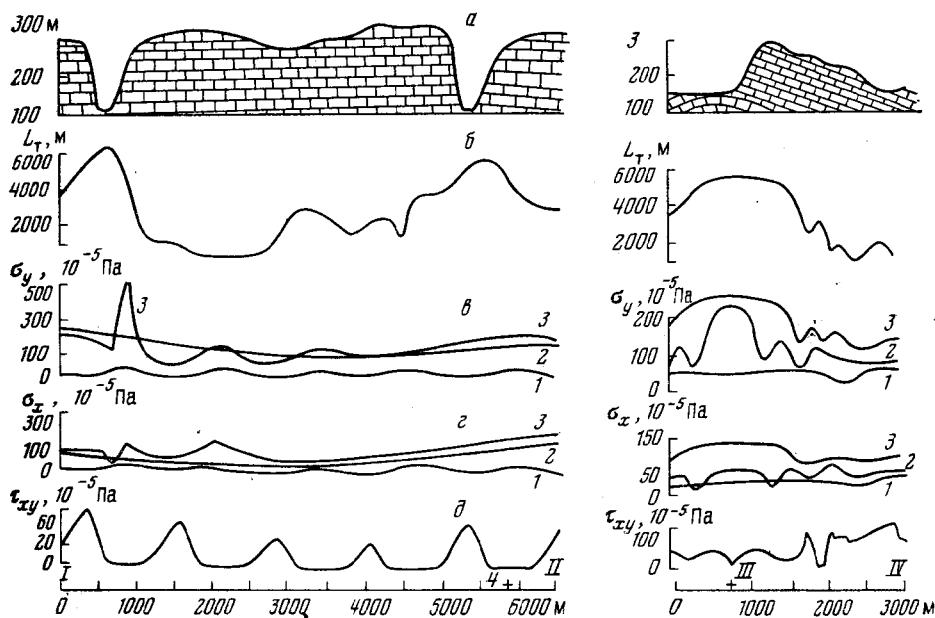


Рис. 5. Распределение нормальных ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) и касательных ( $\tau_{xy}$ ) напряжений вдоль западной длинной (I-II) и южной короткой (III-IV) полуосей антиклинали Ахштыр. а — схематический геологический разрез; б — график распределения общей длины тектонических трещин ( $L_t$ , м) на гектар поверхности массива; в — графики распределения наибольших нормальных напряжений: 1 — при действии на структуру тангенциального сжатия, 2 — вертикального воздымания, 3 — при совместном действии тангенциального сжатия и вертикального воздымания, г — графики распределения наименьших нормальных напряжений: 1 — при действии тангенциального сжатия, 2 — нормального воздымания, 3 — совместном действии тангенциального сжатия и нормального воздымания; д — графики распределения касательных напряжений при совместном действии вертикального воздымания и тангенциального сжатия; 4 — точка пересечения осей структуры

Изолинии касательных напряжений также группируются в зоны, ограниченные нулевыми или минимальными значениями  $\tau_{xy}$  (рис. 4, б). Большие значения  $\tau_{xy}$  (до 0,01 Па) наблюдаются в центральных частях зон, причем максимальные значения касательных напряжений, как правило, соответствуют минимальным значениям  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Нулевые значения  $\tau_{xy}$  имеют место вдоль длинной оси структуры и на участках короткой оси, где нормальные напряжения максимальны. Относительное увеличение касательных напряжений (до 0,003 Па) наблюдается в середине короткой полуоси структуры.

Полную картину сложного напряженного состояния структуры, возникшего при совместном действии тангенциальных сжимающих и нормальных воздымающих усилий, отражают схемы распределения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ , изображенные на рис. 3, б и 4, б. Распределение изолиний нормальных напряжений весьма своеобразно. Прежде всего бросается в глаза неоднозначная ориентировка изолиний  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в различных частях структуры. Изолинии со значениями  $\sigma_x=0,07$ ,  $\sigma_y=0,15$  Па образуют две зоны, линейно вытянутые вдоль длинной полуоси структуры. Внутри этих зон выделяются участки с большими значениями  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , ориентированные перпендикулярно к длинной оси структуры. Максимальные значения нормальных напряжений ( $\sigma_x=0,02$ ,  $\sigma_y=0,08$  Па) наблюдаются не в центральной части структуры, а вблизи западной границы рассматриваемого участка.

Ориентировка изолиний  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  на крыльях антиклинали различна. В районах, прилегающих к центру структуры и ее короткой оси, изолинии нормальных напряжений приобретают наклон к ее длинной оси.

При движении к периклинали угол их наклона увеличивается от 20—25 до 45—70°. Вместе с ним изолинии  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  группируются в зоны, простирание которых соответствует падению крыльев структуры. При движении от короткой оси складки к западной периклинали оно изменяется с южного на юго-восточное, а на участках, близких к западной периклинали,— на восточное и даже северо-восточное. На крыльях структуры и вдоль ее короткой оси величина напряжений постепенно уменьшается к периклиналям, проходя локальные максимумы и минимумы. Изолинии напряжений группируются в зоны, ограниченные относительно максимальными значениями  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ .

Иначе распределены изолинии касательных напряжений (рис. 4, б), хотя в приосевом участке складки, ограниченной изолинией  $\tau_{xy} = 0,003$  Па наблюдается ориентировка участка зон их относительных максимумов и минимумов перпендикулярно длинной оси структуры. На крыльях структуры изолинии  $\tau_{xy}$  расположены параллельно длинной оси, что субперпендикулярно падению пластов горных пород. Минимальные значения касательных напряжений наблюдаются в центральных частях структуры. На середине крыльев антиклинали они достигают своего максимума (до 0,008—0,012 Па). При движении к периклиналям складки они несколько уменьшаются, проходя относительные максимумы и минимумы, но даже на участках, близких к периклиналям, значения  $\tau_{xy}$  остаются довольно высокими (до 0,006 Па).

Сравнивая между собой схемы распределения нормальных и касательных напряжений, имеющих место при действии на структуру одновременно тангенциальных сжимающих и вертикальных вздывающих усилий, видим, что изолинии  $\tau_{xy}$  ни на одном из участков не параллельны изолиниям  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , а секут их под различными углами. На участках, прилегающих к длинной оси структуры, они пересекаются под углами, близкими к 90°, вдоль короткой оси эти углы составляют 45—50°, а на периклинальных окончаниях складки уменьшаются до 30—20°. Это указывает на то, что трещины отрыва, образовавшиеся за счет действия на толщу пород касательных напряжений, никогда не будут параллельны трещинам скальвания, возникающим под действием нормальных напряжений. Они пересекаются друг с другом под различными углами, которые уменьшаются к периклинальным окончаниям складки. На подобную зависимость указывают и полевые замеры элементов залегания тектонических трещин.

Максимальные значения  $\tau_{xy}$  соответствуют минимальным  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Это объясняется тем, что на участках с максимальными значениями нормальных напряжений имеет место значительная раздробленность горных пород трещинами скальвания. В результате сопротивление массива растягивающим усилиям минимально или отсутствует. Касательные напряжения достигают максимальных значений на участках, где нормальные напряжения минимальны. Эти участки наименее разбиты трещинами скальвания, поэтому сопротивление массива растяжению здесь максимально.

По результатам массовых замеров параметров тектонических трещин (более 8000) построена схема изолиний их общей длины ( $L_t$ , м) на гектар поверхности массива. Методика замеров и построения схемы распределения трещиноватости разработана на кафедре инженерной геологии Пермского университета и опубликована в работах [7, 8]. Сопоставление схемы изолиний показателя  $L_t$  со схемами изолиний  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  (рис. 3, в) и  $\tau_{xy}$  (рис. 4, в) позволили выделить три типа участков.

1. Участки с наибольшей раздробленностью пород тектоническими трещинами. Общая длина тектонических трещин на гектар поверхности массива ( $L_t$ ) здесь составляет 3000—6000 м. Они ориентированы перпендикулярно оси структуры, что говорит об определяющем влиянии нормальных напряжений, вызванных тангенциальным сжатием, на фор-

мирование трещиноватости. Часть сильно раздробленной зоны, расположенная в районе пересечения осей структуры, ориентирована субпараллельно длинной оси, а ее юго-восточное продолжение, ограниченное изолинией  $L_t = 3000$  м, пересекает короткую ось и прилегающий к ней участок крыла структуры под углом, близким к  $45^\circ$ . Это показывает, что на данном участке структуры трещиноватость сформировалась преимущественно за счет действия нормальных напряжений, возникающих при вертикальном вздымании. В целом на сильно раздробленных участках нормальные напряжения достигают своих максимальных значений:  $\sigma_y$  от 0,8 до 0,12,  $\sigma_x$  от 0,2 до 0,07 Па. Касательные напряжения здесь минимальны, а в местах максимальной раздробленности  $\tau_{xy} = 0$ . Это говорит о преобладании здесь трещин скальвания поперечной и диагональной систем. Трещины отрыва развиты здесь незначительно. Ввиду значительной раздробленности тектоническими трещинами эти участки являются самыми неблагоприятными для инженерного использования. В наиболее трещиноватых частях массива концентрируются потоки подземных вод. В зонах, ограниченных изолинией  $L_t = 5000$  м (в каньонах рек), по данным В. И. Клименко и В. Н. Дублянского, происходит поглощение до 50% поверхностного стока. Здесь отмечается и максимальная закарстованность.

2. Участки со средней раздробленностью пород тектоническими трещинами ограничены изолиниями  $L_t$  от 3000 до 1000 м. На схеме изолиний показателя  $L_t$  (рис. 2) выделяются две разновидности таких участков: а) расположенные по границам сильно раздробленных участков, повторяющие их ориентировку и тяготеющие к каньонам рек; б) ориентированные субперпендикулярно длинной оси структуры, ограниченные, как правило, изолинией 2000 м и расположенные в осевой части складки. На крыльях ориентировка средне раздробленных участков изменяется. Изолинии  $L_t$  идут под углом, близким к  $45^\circ$ , к длинной оси структуры. Исключение составляет один средне раздробленный участок, ограниченный изолиниями  $L_t = 2000$  м и ориентированный вдоль короткой оси структуры. Нормальные напряжения на средне раздробленных участках изменяются в следующих пределах:  $\sigma_x$  от 0,007 до 0,005 Па,  $\sigma_y$  от 0,19 до 0,09 Па. Их изолинии в целом повторяют ориентировку изолиний  $L_t$ . Значения касательных напряжений колеблются в пределах 0,003—0,008 Па, а изолинии  $\tau_{xy}$  расположены, как правило, вкрест изолиний  $L_t$ .

Таким образом, на средне раздробленных участках, как и на сильно раздробленных, преобладают трещины скальвания диагональной и поперечной систем. При этом трещины скальвания поперечной системы наиболее распространены в осевой части геоструктуры, а диагональной — на ее крыльях. Трещины отрыва развиты слабо. К вышеописанным участкам приурочено развитие оврагов и балок в осевой части структуры и на ее крыльях. Их направление полностью совпадает с направлением изолиний  $L_t$ .

3. Слабо раздробленные тектоническими трещинами участки расположены в середине длинной полуоси структуры и на ее крыльях. Они ограничены изолиниями  $L_t = 1000$  м и менее. В осевой части складки они ориентированы как вдоль длинной оси, так и перпендикулярно ей. На крыльях изолинии  $L_t$  образуют с длинной осью структуры угол, близкий к  $45^\circ$ , хотя в центре рассматриваемого крыла имеется участок, ограниченный изолинией  $L_t = 500$  м, простирающийся вдоль длинной оси складки. На крыльях и в осевой части структуры ориентировка слабо раздробленных зон полностью совпадает с ориентировкой изолиний  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Величины нормальных напряжений колеблются соответственно от 0,05 до 0,025 и от 0,1 до 0,05 Па, являясь минимальными для рассматриваемого участка. Изолинии касательных напряжений пересекают изолинии  $L_t$  (особенно на крыльях складки) под углами, близкими к  $90^\circ$ , причем

относительные минимумы  $L_t$  соответствуют относительным максимумам  $\tau_{xy}$ . Подобная взаимосвязь вычисленных напряжений с трещиноватостью показывает, что в слабо раздробленных зонах довольно широко развиты трещины отрыва, причем чем меньше раздробленность трещинами скальвания, тем большее развитие получают трещины отрыва. Так, на участках, ограниченных изолиниями  $L_t = 500$  м, можно предположить наличие лишь единичных трещин скальвания и максимальное развитие трещин отрыва. Сказанное подтверждается и тем, что на этих участках развиты, как правило, неглубокие эрозионные врезы, ориентированные субперпендикулярно падению крыльев складки.

Конкретная количественная взаимосвязь между трещиноватостью и вычисленными напряжениями  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  наглядно демонстрируется графиками на рис. 5. На этих графиках отражено распределение нормальных и касательных напряжений, а также общей длины тектонических трещин на гектар поверхности массива по короткой южной и длинной западной полуосям антиклинали Ахштырь.

Рассмотрим графики для длинной полуоси. Как относительные, так и абсолютные максимумы  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , рассчитанных при действии на структуру тангенциального сжатия (кривые 1), здесь совпадают с относительными и абсолютными максимумами на графике показателя  $L_t$ , хотя прямой корреляции не наблюдается. График напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , вызванных действием на породы нормальных воздымающих усилий (кривые 2), не имеет ярко выраженных максимумов и минимумов, хотя наблюдается тенденция уменьшения нормальных напряжений к центру полуоси, что в принципе соответствует графику распределения трещиноватости (рис. 5, б). В свою очередь, на графиках распределения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , проявившихся под совместным действием тангенциального сжатия и нормального воздымания (кривые 3), отчетливо видны максимумы и минимумы различной амплитуды, которые соответствуют максимумам и минимумам на графике распределения показателя  $L_t$ .

Несколько по-другому распределены напряжения на короткой полуоси складки. Прежде всего бросается в глаза отсутствие максимумов на графиках распределения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , возникающих под действием тангенциального сжатия (кривые 1). Здесь имеются лишь минимумы, соответствующие минимальному значению  $L_t$ . Графики распределения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , возникших под действием на складку вертикальных воздымающих усилий (кривые 2), изобилуют максимумами и минимумами, которые частично соответствуют максимумам и минимумам графика распределения показателя  $L_t$ . Кривая нормальных напряжений, возникших при совместном действии на массив тангенциального сжатия и нормального воздымания (кривые 3), как и для длинной оси структуры, полностью соответствует графику распределения показателя трещиноватости.

Обращая внимание на графики распределения касательных напряжений, проявившихся под совместным действием как тангенциального сжатия, так и нормального воздымания (рис. 5, д), отметим, что практически все их максимумы соответствуют минимумам на кривых распределения показателя  $L_t$ . Это подтверждает вывод о преимущественном развитии отрыва на участках, слабо раздробленных трещинами скальвания.

Таким образом, можно заключить, что приосевая часть рассматриваемой структуры подвергалась деформациям главным образом за счет тангенциального сжатия, а не вертикального воздымания. Поэтому распределение трещиноватости вдоль длинной оси складки в большей мере отвечает распределению  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , проявившихся за счет тангенциального сжатия. Нормальные напряжения, возникшие на втором этапе деформации толщ пород за счет вертикального их воздымания, лишь увеличили имеющиеся  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , не повлияв существенно на характер их распределения. Наоборот, на крыльях структуры, значительно деформировавшихся при воздымании блоков фундамента, нормальные напряжения,

вызванные тангенциальным сжатием, на первом этапе развития складки послужили лишь фоном; на втором этапе деформирования структуры на них наложились значительно большие по величине напряжения, вызванные вертикальным воздыманием пластов горных пород. Касательные напряжения, возникшие на деформированной поверхности массива, не оказали столь существенного влияния на распределение трещиноватости, хотя на участках, где наблюдаются минимальные значения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  напряжения  $\tau_{xy}$  и вызванная ими трещиноватость отрыва, как правило, достигают своих максимальных значений.

## Выводы

Автор ни в коем случае не рассматривает изложенные в настоящей работе расчеты напряженного состояния тектонической складки как единственно возможный путь к изучению структуры массива горных пород. Все же достаточно удовлетворительная, на наш взгляд, схожесть картины распределения вычисленных напряжений с распределением тектонической трещиноватости указывает на возможность использования таких расчетов в качестве прогнозной схемы на первых этапах инженерно-геологического изучения тектонических структур. Зная геометрические параметры складок, их генезис, геологическое строение и физико-механические свойства пород, можно, решая соответствующие задачи теории упругости, составить достаточно достоверное представление о наличии в них зон с различной степенью раздробленности тектонически-ми трещинами. Это позволит заранее выявить наиболее ослабленные участки массива горных пород, которые будут характеризоваться повышенной водообильностью и наличием локализованных путей движения подземных вод, а также карстовых полостей. Применение же для оценки раздробленности массива показателя  $L_t$  (длины тектонических трещин на единицу площади его поверхности) позволяет, помимо густоты трещиноватости, оценить площадь их стенок в заданном интервале разреза, что необходимо при прогнозе карстовых явлений.

## ЛИТЕРАТУРА

- . Белоусов В. В., Гзовский М. В. Экспериментальная тектоника. М.: Недра, 1964. 119 с.
- . Белоусов В. В. Геотектоника. М.: Изд-во МГУ, 1976. 331 с.
- . Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967, с. 313—363.
- . Гзовский М. В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- . Жемочкин Б. Н. Теория упругости. М.: Госстройиздат, 1953. 380 с.
- . Спенсер Э. У. Введение в структурную геологию. Л.: Недра, 1981. 366 с.
- . Печеркин А. И., Печеркин И. А., Болотов Г. Б. Особенности методики изучения тектонической трещиноватости закарстованного массива.— В кн.: Гидрогеология и инженерная геология. Полевые методы исследований: Межвузовский сб. Новочеркасск, 1981, с. 69—73.
- . Печеркин А. И., Катаев В. Н. Вопросы изучения тектонической трещиноватости закарстованных массивов.— В кн.: Гидрогеология и карстоведение: Межвузовский сб. Пермь, 1981, с. 75—82.
- . Печеркин А. И., Катаев В. Н. К расчету напряжений, возникающих при формировании платформенных брахиантклиналей.— Инж. геология, 1983, № 5, с. 75—83.

УДК 624.131

ПЛОТНИКОВ Н. И.

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА НА ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ПРИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В Советском Союзе постоянно осуществляется интенсивное водохозяйственное строительство крупных городов и равнинных водохранилищ многолетнего регулирования стока, мощных гидроэлектростанций, ирригационных и транспортных каналов большой протяженности, оросительных систем для освоения крупных земельных массивов, осушение заболоченных территорий. Производится интенсивный отбор подземных вод для целей водоснабжения и орошения системой крупных водозаборов и др. Особенно интенсивно развивается водохозяйственная деятельность в аридной зоне нашей страны.

При длительной эксплуатации водохозяйственных объектов в верхней части земной коры формируется техногенез водохозяйственного профиля, вызывающий различные изменения в литосфере. Позитивное влияние техногенеза на окружающую среду проявляется в формировании на осваиваемых территориях современных культурных ландшафтов, преобразование степных и пустынных районов в оазисы, где успешно развивается поливное земледелие с высокими урожаями различных сельскохозяйственных культур.

С другой стороны, при длительной эксплуатации водохозяйственных объектов налицо отрицательное влияние на геологическую и нередко окружающую среду в целом. Отмечается целый комплекс техногенных процессов, негативное влияние которых приводит к качественным изменениям состояния литосферы [3]. Поэтому важное значение приобретают комплексные исследования, позволяющие своевременно принимать природоохранные меры по защите биологических свойств окружающей среды.

Как известно, в Советском Союзе водохозяйственные мероприятия осуществляются в больших масштабах в республиках Средней Азии, на юге Казахстана, Украины, юге Российской Федерации, в Нечерноземной зоне европейской части страны, в Заволжье и других районах. В связи с этим, небезынтересно рассмотреть опыт водохозяйственного освоения земель в республиках Средней Азии, где на значительной площади можно проследить, как меняются свойства литосферы.

Советские республики — Туркмения, Узбекистан, Таджикистан, Киргизия и южные районы Казахстана, где весьма интенсивно осуществляется водохозяйственная деятельность, расположены в бассейне Аральского моря. Поскольку Аральское море не имеет связи с океаном, всю эту площадь следует рассматривать как область внутреннего поверхности и подземного стока, т. е. наиболее специфический в геолого-гидрогеологическом отношении регион, имеющий мало аналогов в нашей стране (к ним относятся, например, бассейны Каспийского моря, озера Балхаш в Казахстане и озера Иссык-Куль в Киргизии). Площадь бассейна Аральского моря составляет более 750,0 тыс. км<sup>2</sup>, а общая площадь пахотных земель, пригодных для орошения, — около 40,0 млн. га, из которых в настоящее время поливным земледелием освоено не более 20%.

По степени и интенсивности водохозяйственной деятельности, по характеру проявления техногенеза всю площадь бассейна Аральского моря условно можно подразделить на две крупные области: горно-складчатую, занимающую примерно 20—25% общей площади бассейна, и равнинно-степную и пустынную, занимающую остальную часть региона. В первой области качественные изменения в литосфере происходят на локальных участках, например, под влиянием осушения горных выработок в стадии эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых или эксплуатации горных водохранилищ, построенных в верховьях крупных рек. Что касается второй области, то техногенез водохозяйственного профиля приводит здесь к существенным преобразованиям на большой площади — в региональном масштабе.

Естественная гидрографическая сеть бассейна Аральского моря представлена двумя крупными реками — Амударьей и Сырдарьей, с многочисленными их притоками — Сурхандарья, Кашикдарья, Чирчик, Ангрен и др. Все орошающее земледелие в республиках Средней Азии развивается в широких речных долинах, в равнинно-степной зоне, а также в межгорных впадинах. Поливное земледелие осуществляется главным образом за счет использования поверхностных вод и в меньшей степени — подземных (всего на 3—5% от общей площади поливного земледелия). В этом заключается особенность формирования техногенеза водохозяйственного профиля равнинно-степной части Средней Азии. Для некоторых стран, таких, например, как США, Индия, Пакистан и др., характерно, напротив, преимущественное использование подземных вод (до 40—60% от всей площади орошения). В пустынных зонах Средней Азии и Южного Казахстана оазисное орошение развивается также исключительно за счет подземных вод.

С целью повышения эффективности использования ресурсов поверхностных вод для орошения и энергетических целей в бассейнах рек Амударьи и их крупных притоков построен целый каскад гидроэлектростанций и крупных водохранилищ многолетнего регулирования стока, а также создана система магистральных ирригационных каналов: Каракумский, Каршинский, Ферганский, Бухарский, Ташкентский, Южно-Казахстанский и многие другие.

По существу, в современных условиях водохозяйственной деятельности в бассейне Аральского моря коренным образом нарушен естественный режим поверхностного стока всего бассейна в целом и создана новая техногенная гидрографическая сеть. Всего в бассейне Аральского моря проведено 2200 крупных и мелких ирригационных каналов общей протяженностью около 170,0 тыс. пог. км, построена коллекторско-дренажная сеть общей протяженностью более 73,0 тыс. пог. км [2]. На орошаемых землях действует большая сеть вертикального дренажа в районах оросительных систем, а также эксплуатируется более 2500 гидрогеологических скважин, отбирающих подземные воды для водоснабжения и орошения.

Как показала повторная гидрогеологическая съемка и другие исследования на отдельных орошаемых площадях, под влиянием водохозяйственной деятельности в региональном масштабе в равнинно-степной части Средней Азии произошли коренные изменения природных гидрогеологических и инженерно-геологических условий, состояния и свойств геологической среды.

Стационарными режимными наблюдениями было установлено, что эволюционные изменения состояний литосферы в этом регионе происходят под влиянием большого комплекса тесно связанных между собой техногенных процессов, механизм которых определяется основным фактором — направленностью тепломассообмена. Совокупность этих процессов и формирует в верхней части разреза земной коры техногенез. При действии дренажных систем тепломассообмен направлен из недр земли

к поверхности, а при эксплуатации водохранилищ, ирригационных каналов на орошаемых массивах, которая сопровождается интенсивной инфильтрацией поверхностных вод, тепломассообмен четко прослеживается в обратном направлении.

Научное понятие «техногенез» было введено академиком А. Е. Ферсманом [5], который при изучении условий эксплуатации рудных месторождений подчеркивал, что в результате добычи твердых полезных ископаемых и неизбежных потерь рудной массы на поверхности земли всегда формируются техногенные геохимические ландшафты. Применительно к водохозяйственной деятельности техногенез имеет расширенное значение, охватывающее всю совокупность техногенных процессов, проявляющихся в верхней части земной коры.

Принципиально важным и мощным фактором техногенного воздействия на естественную гидрогеологическую и инженерно-геологическую обстановку при водохозяйственной деятельности является существенное изменение в региональном плане условий питания и разгрузки подземных вод, происходящее под влиянием больших инфильтрационных потерь поливных вод на орошаемых массивах и поверхностных вод ирригационных каналов и водохранилищ (в частности, интенсивное испарение влаги с почвенного покрова — как форма разгрузки подземных вод). При этом питание и разгрузка подземных вод имеет площадной характер [6].

Под влиянием техногенных процессов в регионе происходит наиболее существенное изменение природных условий в следующих направлениях: 1) коренное преобразование в региональном плане структуры общего водного и водно-солевого баланса подземных вод, изменяется взаимоотношение отдельных статей водного баланса; 2) принципиальные изменения условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод; 3) существенные изменения условий и глубины залегания, а также распространения первого от поверхности водоносного горизонта грунтовых вод, их режима (уровень) и качества; 4) значительное уменьшение на многих участках мощности зоны аэрации (за счет техногенного подъема уровня грунтовых вод); 5) формирование вдоль крупных ирригационных каналов — под влиянием неизбежных инфильтрационных потерь, — прикаinalьных потоков пресных грунтовых вод, ресурсы которых могут иметь большое практическое значение для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения городов и сельскохозяйственных объектов; 6) значительное увеличение естественных ресурсов подземных вод за счет их дополнительного питания; 7) существенное изменение инженерно-геологических условий региона, особенно на подтопляемых территориях и в области распространения лёссовидных пород.

Эволюционные изменения литосферы при эксплуатации водохозяйственных объектов имеют следующие последствия: 1) в районах со слабой естественной дренированностью на поливных землях интенсивно развивается вторичное засоление почв и заболоченность территорий, существенно влияющих на изменение биологических свойств геологической и окружающей среды в целом; площади, пораженные этими процессами, как правило, выпадают из общего севооборота и требуют принятия радиальных природоохранных мер по восстановлению плодородия земель — путем применения специальных дренажных устройств, промывки почвы и др.; 2) значительно изменяется химический состав подземных вод под влиянием континентального засоления; отмечается загрязнение и повышение их общей минерализации (до 10—12 г/л), в том числе ухудшение их питьевого качества; 3) в городах и других пунктах, близко расположенных к поливным землям, происходит подтопление городских территорий в связи с подъемом уровня грунтовых вод и слабой естественной дренированностью территории; создаются предпосылки для возможного затопления подвальных помещений и деформации поверхностных сооружений; 4) в области развития лёссовидных пород, занимающих большие

площади, на поливных землях по трассам ирригационных каналов и непосредственно на массивах орошения проявляются просадочные процессы, что может привести к деформации поверхности и возведенных сооружений, а также к осложнению условий эксплуатации водохозяйственных объектов.

При водохозяйственном освоении земель в республиках Средней Азии, как отмечалось, действует целая система дренажно-осушительных устройств (горизонтальный и вертикальный дренаж), а также система крупных групповых линейных и площадных водозаборных сооружений. Дренажно-осушительные устройства призваны играть эффективную роль по предотвращению негативного влияния таких техногенных процессов, как вторичное засоление почв и заболоченность территории, подтопление городских территорий и др. Системы водозаборных сооружений служат техническим средством отбора подземных вод для орошения и водоснабжения. Во многих районах водохозяйственной деятельности, и прежде всего на поливных землях, происходит, следовательно, взаимодействие целого комплекса разнонаправленных по тепломассообмену техногенных процессов сложного типа [3], механизм которых и прогнозная оценка их взаимодействия в региональном плане, как отмечалось, пока изучены очень слабо. В этом и состоит одна из особенностей техногенеза водохозяйственного профиля.

Непосредственно на площади равнинных водохранилищ происходит переработка берегов водохранилищ, а также подпор потоков подземных вод. Предполагается, что в сейсмических районах, на участках эксплуатации крупных горных водохранилищ, могут формироваться процессы, приводящие к техногенным, «вызванным» землетрясениям, которые формируются при взаимодействии экзогенных и эндогенных факторов; несмотря на чрезвычайную важность этого вопроса, физическая сущность возникающего при этом так называемого гидрогеодинамического эффекта пока изучена недостаточно.

Таким образом, при водохозяйственной деятельности в пределах крупных осваиваемых территорий равнинно-степной части Средней Азии происходит коренное преобразование верхней части литосферы, при котором, с одной стороны, четко наблюдаются позитивные изменения окружающей среды в целом, создающие благоприятные условия для строительства культурных ландшафтов, с другой — негативное влияние техногенных процессов, ухудшающих геологические и экологические свойства окружающей среды. В верхней части разреза происходит формирование качественно новой структуры литосферы. Ее изучение на площади водохозяйственной деятельности — важная задача современных техногенных исследований.

К сожалению, методы прогнозной оценки разнонаправленных техногенных процессов в условиях их регионального взаимодействия разработаны слабо, поэтому прогнозная оценка негативного влияния техногенеза на окружающую среду на примере Среднеазиатского региона не всегда подтверждается практикой. Наиболее существенными из методов прогноза являются гидродинамический и метод математического моделирования. Для повышения достоверности прогнозных оценок необходимо разработать теорию формирования техногенных процессов и техногенеза в целом.

Таким образом, в результате многолетней эксплуатации крупных оросительных систем, ирригационных и гидротехнических сооружений в пределах равнинно-степной и пустынной зоны бассейна Аральского моря, произошло закономерное формирование техногенеза водохозяйственного профиля. Особенности его состоят в том, что на значительной площади произошли качественные изменения свойств литосферы (в вертикальном разрезе техногенез при этом проникает на небольшую глубину — до 30—50 м.).

Опыт водохозяйственного освоения равнинно-степных и пустынных зон в республиках Средней Азии и Южного Казахстана показывает, что для успешного и наиболее эффективного развития гидротехнического ирригационного строительства, строительства оросительных систем на крупных земельных массивах, дренажных систем, а также освоения групповых водозаборов подземных вод целесообразно своевременно решить целый комплекс проблемных задач. Основными из них являются следующие.

В стадии предпроектных разработок водохозяйственного освоения новых территорий целесообразно проводить по единой программе опережающие комплексные гидрогеологические и инженерно-геологические исследования, в процессе которых необходимо: а) провести предварительно традиционное изучение естественно-исторических условий района и оценить степень его естественной дренированности, б) получить достоверную исходную гидрогеологическую информацию для конкретного проектирования различных гидротехнических, ирригационных и оросительных объектов, в) с учетом проектных разработок дать прогнозную оценку условий формирования техногенных процессов и их комплексное позитивное и негативное влияние на изменение свойств окружающей среды, г) обосновать проектирование защитных осушительно-дренажных и других природоохранных мероприятий по защите геологической и окружающей среды в целом.

Для осуществления контроля и получения данных для прогноза необходимо организовать в стадии изысканий мониторинг режима подземных и поверхностных вод. Стационарная сеть опорных наблюдательных пунктов при этом должна быть подчинена решению перечисленных выше задач.

Такая опережающая комплексная направленность изучения гидрогеологических и инженерно-геологических условий осваиваемых территорий позволит своевременно запроектировать, а затем осуществить на практике наиболее рациональную для данных условий систему использования природных ресурсов (земельного фонда и водных ресурсов), до минимума снизить негативное влияние техногенеза. При этих условиях эволюционное преобразование литосферы и формирование культурного ландшафта под влиянием техногенеза будет иметь направленный характер [1].

В староорошаемых районах и районах крупных водохранилищ, на площади которых в условиях сложившейся многолетней их эксплуатации уже произошло эволюционное преобразование верхней части литосферы, а также проявилось позитивное влияние техногенеза, крайне необходимо обобщить накопленный опыт эксплуатации и провести прежде всего комплексные гидрогеологические и инженерно-геологические исследования техногенного направления. Они должны включать: а) целенаправленные стационарные наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод — мониторинг режима (включая режимно-балансовые исследования), б) повторную комплексную съемку, охватывающую территорию действующих водохозяйственных систем и прилегающих районов, на площади которых не оказывается влияние техногенеза. Такие комплексные исследования необходимы для регионального изучения техногенных изменений гидрогеологических и инженерно-геологических условий, прошедших под влиянием длительной эксплуатации обводнительных объектов, и сравнения этих изменений с естественной природной обстановкой, существовавшей до водохозяйственного освоения территории. Такая сравнительная оценка позволит выявить для литосферы основные эволюционные закономерности, изучить механизм формирования взаимодействующих разнонаправленных техногенных процессов и техногенеза в целом, выявить их негативное влияние на изменение свойств окружающей среды и таким образом получить необходимую исходную информацию для проектирования дополнительных природоохранных мероприятий по

защите окружающей среды. Опыт повторного техногенного изучения водохозяйственных объектов Каршинской степи в Узбекистане, проведенный специалистами ПГО «Узбекгидрогеология», полностью подтверждает это важное научно-методическое положение.

Таким образом, изучение и оценку коренного изменения гидрологических и инженерно-геологических условий крупных регионов водохозяйственной деятельности целесообразно начинать от изучения техногенеза и его комплексного влияния на преобразование верхней части литосферы.

В заключение следует отметить, что опыт эксплуатации водохозяйственных систем в равнинно-степной и пустынной зонах, накопленный в Средней Азии и других регионах Советского Союза, так же, как условия эволюционного преобразования свойств литосферы, еще недостаточно изучен и очень слабо обобщен; слабо разработаны, как отмечалось, методы прогнозирования формирования сложных, находящихся во взаимодействии, техногенных процессов и их негативного влияния на региональное изменение экологических условий [4]. Это обстоятельство четко определяет направления дальнейших комплексных научных и производственных исследований в такой весьма важной для народного хозяйства проблеме как гидрологические аспекты охраны окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В. И. Размышления натуралиста. М.: Наука, 1977. 121 с.
2. Плотников Н. И., Краевский С. Гидрологические аспекты охраны окружающей среды. М.: Недра, 1983. 206 с.
3. Плотников Н. И., Карцев А. А. Управление техногенными гидрологическими процессами — как основа охраны экосистем//Тр. 27 Междунар. Геол. конгресса. Т. 16. М.: 1984. С. 113—118.
4. Сергеев Е. М. Научно-технический прогресс и охрана окружающей среды//Земля и Вселенная, 1985. № 3. С. 34—41.
5. Ферсман А. Е. Геохимия. Т. 3. М.: Недра, 1937. 504 с.
6. Ходжикаев Н. Н., Самойленко В. Г. Гидрологомелиоративные процессы. Т. 1. Ташкент: ФАН, 1976. 358 с.

Московский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
3.1.1986

УДК 624.131

ДМИТРИЕВ В. В., ЛЕГА Е. А.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Для обоснования проектов строительства различных сооружений в процессе разнообразных инженерно-геологических исследований используют более 200 характеристик грунтов. В основном их получают при полевых и лабораторных испытаниях. В нормативной литературе, руководствах по инженерно-геологическим исследованиям отсутствует требование обязательного контроля точности результатов испытаний, действующее при геохимических, гидрогеохимических, геодезических и других работах. Следствием является неопределенность результатов испытаний грунтов. Необходим контроль точности определения характеристик грунтов, который позволит получать стабильные результаты испытаний с погрешностями, не превышающими заданных пределов; выявлять и изучать факторы, обусловливающие ошибки анализов; разрабатывать методы управления точностью определения характеристик грунтов.

Разработка методики контроля точности определения характеристик грунтов начинается с выбора контролируемых величин [4]. В соответствии с теорией ошибок измерений и ГОСТом 8.011-72 оптимальными для контроля будут случайная и систематическая составляющие погрешности измерения, рекомендуемые нормативными документами в качестве показателей точности. Оценкой случайной составляющей погрешности измерения характеристики грунта в инженерно-геологической лаборатории является ошибка внутрилабораторной воспроизводимости —  $\sigma_{bi}$ , систематической — разность  $\Delta_i$  между средним значением характеристики, полученным в данной лаборатории  $\bar{x}_i$ , и истинным или действительным значением параметра [3]. В качестве последнего может использоваться генеральное среднее значение показателя  $x$ , полученное при изучении стандартного образца во многих лабораториях.

$$\sigma_{bi} = \left[ \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / (n-1) \right]^{0,5}, \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} / n, \quad (2)$$

$$\Delta_i = \bar{x}_i - \bar{\bar{x}}, \quad (3)$$

$$\bar{\bar{x}} = \sum_{i=1}^k \bar{x}_i / k, \quad (4)$$

где  $x_{ij}$  — частное значение показателя;  $n (j=1 \dots n)$  — число образцов, исследованных в  $i$ -той лаборатории;  $k (i=1 \dots k)$  — число лабораторий, участвующих в эксперименте.

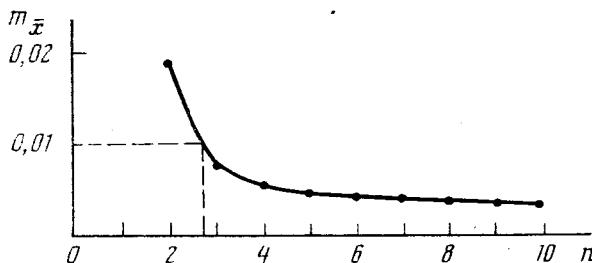


Рис. 1. График зависимости ошибки внутрилабораторной воспроизводимости влажности суглинков от числа проб при доверительной вероятности 0,85

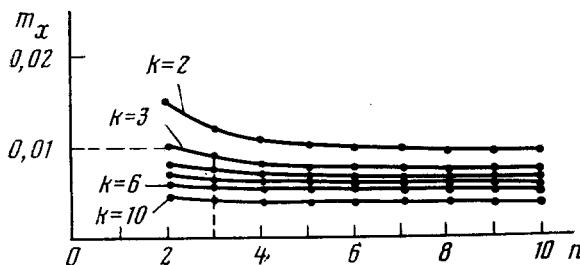


Рис. 2. График зависимости ошибки межлабораторной воспроизводимости влажности суглинков от числа проб и лабораторий при доверительной вероятности 0,85

Значения  $\sigma_{bi}$  и  $\Delta_i$  определялись в течение ряда лет для различных песчаных и глинистых грунтов по данным 26 инженерно-геологических лабораторий. Наличие частных значений  $\sigma_{bi}$  и  $\Delta_i$  позволило найти среднелабораторные оценки систематической и случайной составляющих погрешности, соответственно ошибки межлабораторной  $\sigma_m$  и внутрилабораторной  $\sigma_b$  воспроизводимости [2].

$$\sigma_b = \left( \sum_{i=1}^k \sigma_{bi}/k \right)^{0.5}, \quad (5)$$

$$\sigma_m = \left( \sum_{i=1}^k \Delta_i^2/(k-1) - \sigma_b^2/n \right)^{0.5} \quad (6)$$

Средние оценки, вычисленные для покровных ( $prQ_{II-III}$ ), моренных ( $gQ_{II}$ ) и озерно-ледниковых ( $lgQ_{II}$ ) суглинков, приводились ранее [1, 2].

Далее определялось число образцов и лабораторий, необходимых для осуществления контроля точности. Задача формулировалась следующим образом. Необходимо найти такое число параллельных анализов в одной лаборатории и такое число лабораторий, чтобы случайная и систематическая составляющие погрешности внутри- и межлабораторного среднего значения показателя были примерно равны, реально достижимы с помощью имеющихся средств и методик измерения и удовлетворяли бы эксплуатационным требованиям. Бессмысленно, к примеру, уменьшать ошибку воспроизводимости модуля деформации в лаборатории, имея неисправный компрессионный прибор, постоянно повышающий или занижающий результат измерения. И наоборот, при значительной случайной составляющей погрешности нецелесообразно добиваться уменьшения малых систематических отклонений.

Таблица 1

Число параллельных анализов и лабораторий, необходимых для контроля точности определения характеристик суглинков

Характеристика суглинков	Доверительная вероятность					
	0,85			0,95		
	точность $m_{\bar{x}} \approx m_{\tilde{x}}$	число ана- лизов $n$	число ла- бораторий $k$	точность $m_{\bar{x}} \approx m_{\tilde{x}}$	число ана- лизов $n$	число ла- бораторий $k$
Влажность $W$ , дол/ед.	0,01	3	3	0,01	4	4
Плотность частиц грунта $\rho_S$ , г/см <sup>3</sup>	0,02	3	3	0,02	3	4
Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,02	4	7	0,02	7	7
Граница раскатывания $W_P$ , %	2	2	4	2	3	5
Граница текучести $W_L$ , %	2	2	3	2	3	4
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	3	4	5	3	6	8
Сцепление $C$ , МПа	0,02	4	3	0,02	5	5
Модуль деформации $E_{1-2}$ , МПа	3	3	3	3	4	5

Наличие среднелабораторных ошибок внутрилабораторной воспроизводимости позволило определить точность оценок средних значений показателей свойств грунтов  $m_{\bar{x}}$  в инженерно-геологической лаборатории в соответствии с ГОСТом 20522-75:

$$m_{\bar{x}} = t_{\alpha} \sigma_B / n^{0.5}, \quad (7)$$

где  $t_{\alpha}$  — коэффициент, зависящий от числа степеней свободы и доверительной вероятности  $\alpha$ ;  $n$  — число анализов в одной лаборатории.

По формуле (7) находились величины  $m_{\bar{x}}$  для отдельных характеристик грунтов, соответствующие различному числу параллельных внутрилабораторных анализов  $n=2-10$ . Значение  $\alpha$  принималось 0,85 и 0,95. Далее строились графики зависимости  $m_{\bar{x}}=f(n)$  для различных показателей свойств грунтов, аналогичные представленному на рис. 1. На графиках четко прослеживаются участки выполнаживания кривых начиная с определенного значения  $n$ .

Погрешность генерального среднего  $m_{\bar{x}}$  из-за наличия ошибок внутри- и межлабораторной воспроизводимости по данным многих лабораторий равна

$$m_x = t_{\alpha} (\sigma_B^2 / kn + \sigma_m^2 / k)^{0.5}, \quad (8)$$

где  $k$  — число лабораторий, участвующих в определении среднего значения характеристики грунта.

Предположив, что

$$\sigma_m^2 = u \sigma_B^2, \quad (9)$$

и выполнив известные [5] преобразования в формуле (8), получаем

$$m_{\bar{x}} = t_{\alpha} \sigma_B (nu + 1)^{0.5} / nk^{0.5}. \quad (10)$$

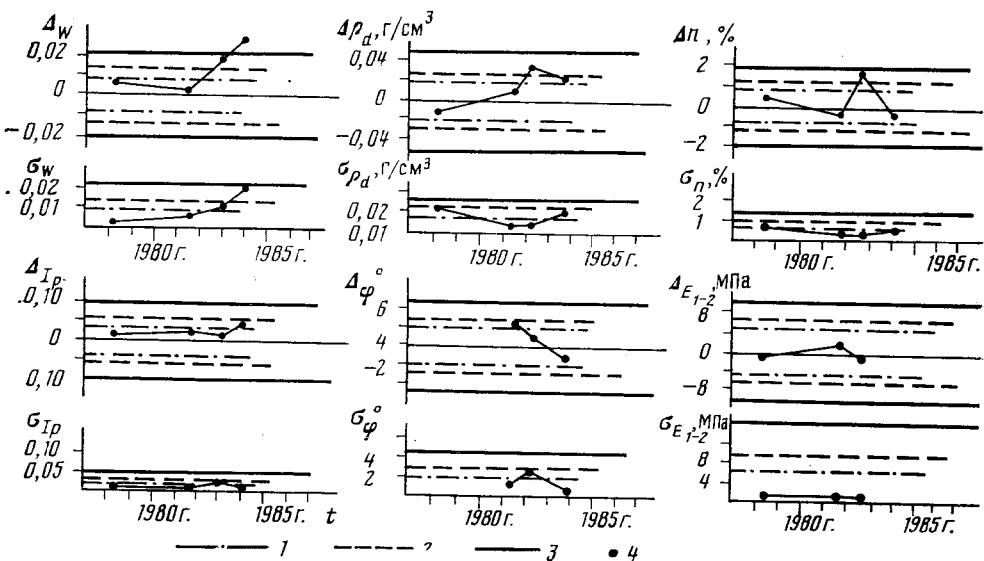


Рис. 3. Контрольная карта погрешностей характеристик глин в лаборатории № 1. Границы регулирования: 1 — для первого контрольного уровня, 2 — для второго контрольного уровня, 3 — для третьего контрольного уровня, 4 — погрешность измерения характеристики грунта

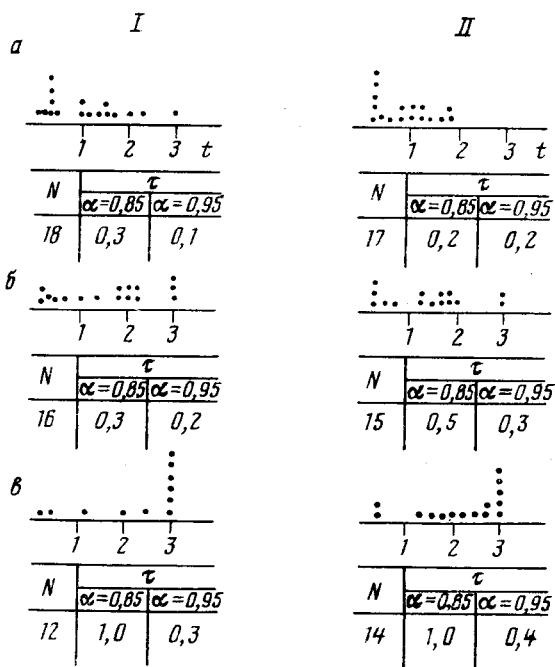


Рис. 4. Гистограммы периодов налаженного процесса определения анализа влажности суглинков. I — для систематической составляющей погрешности, II — для случайной составляющей погрешности; а — для третьего контрольного уровня, б — для второго контрольного уровня, в — для первого контрольного уровня

Таблица 2

## Периоды контроля точности определения характеристик суглинков

Характеристика суглинков	Период контроля, год									
	систематическая составляющая погрешности					случайная составляющая погрешности				
	контрольные границы									
	1,6 $\sigma_m$	$\sigma_m$	0,7 $\sigma_m$	1,6 $\sigma_b$	$\sigma_b$	0,7 $\sigma_b$	доверительная вероятность			
	0,85	0,95	0,85	0,95	0,85	0,95	0,85	0,95	0,85	0,95
Влажность $W$ , дол. ед.	0,3	0,1	0,3	0,2	1,0	0,3	0,2	0,2	0,5	0,3
Плотность частиц грунта $\rho_s$ , $\text{г}/\text{см}^3$	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
Плотность грунта $\rho$ , $\text{г}/\text{см}^3$	0,7	0,2	2,5	2,0	3,0	2,5	0,3	0,2	0,4	0,4
Граница раскатывания $W_p$ , %	0,5	0,5	0,7	0,5	2,0	0,8	0,3	0,1	0,7	0,5
Граница текучести $W_L$ , %	0,3	0,2	0,6	0,5	2,0	0,4	0,2	0,1	0,6	0,3
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
Сцепление $C$ , МПа	0,5	0,5	0,6	0,6	1,0	0,6	0,5	0,3	1,0	0,4
Модуль деформации $E_{1-2}$ , МПа	0,5	0,3	0,6	0,4	2,0	0,7	1,5	0,5	1,8	1,0
									2,0	1,4

Выбирая различные  $n$  и  $k$ , строим графики зависимости  $m_{\bar{x}} = f(k, n)$  (рис. 2). На графиках видно, что при увеличении числа лабораторий примерно до семи происходит быстрое уменьшение  $m_{\bar{x}}$ . Дальнейший рост числа лабораторий мало влияет на погрешности средних значений показателей свойств грунтов. Предположив, что  $m_x \approx m_{\bar{x}}$ , и сопоставив их с имеющейся в настоящее время на практике погрешностью характеристик грунтов, по графикам (рис. 1, 2) подбираем  $n$  и  $k$ , обеспечивающих минимальные затраты и требуемую точность лабораторной оценки показателей свойств грунтов. Некоторые данные расчетов приведены в табл. 1.

В соответствии с ГОСТом 15893-77 статистическое регулирование точности лабораторного определения показателей свойств грунтов проводится периодически. Поэтому при разработке методики контроля точности определения характеристик грунтов необходима оценка периода контроля ( $\tau$ ). Его значение обуславливается длительностью налаженного процесса испытаний грунта. При налаженном процессе характеристика грунта определяется с погрешностью, не превышающей заданный контрольный уровень или границу регулирования ( $\xi$ ). Выход за контрольный уровень свидетельствует о разложении анализа и необходимости соответствующей коррекции.

Выбор границ регулирования проводился для каждой характеристики песчаных и глинистых грунтов, причем были рассчитаны три границы регулирования [2]. Первая соответствовала значениям систематической погрешности определения параметра в  $i$ -той лаборатории  $\pm \xi_m'$ , равной соответственно  $\pm 1,6 \sigma_m$ , и значениям случайной погрешности  $\xi_b'$ , равной  $1,6 \sigma_b$ . Выход результатов анализа какой-либо характеристики грунта за этот контрольный уровень указывал на то, что по сравнению со среднелабораторными результатами анализа попадают в число 10% наиболее откло-

нившихся от действительного значения измеряемой величины ( $\bar{x}$ ). Второй контрольный уровень  $\xi_m'''$  был равен для систематической погрешности  $\pm \sigma_m$ , а для случайной —  $\sigma_b$ . Его превышение полученными в лаборатории значениями соответственно  $\pm \Delta_i$  и  $\sigma_{bi}$  свидетельствует о попадании их в число 30% наиболее отклонившихся от  $x$ . Для третьего контрольного уровня использовались значения  $\pm \xi_m''' = 0,7 \sigma_m$  и  $\xi_b''' = 0,7 \sigma_b$ . Границы регулирования определялись на основании предварительных оценок систематической ( $\Delta_i$ ) и случайной ( $\sigma_{bi}$ ) погрешностей измерения характеристик свойств грунтов в  $i$ -той лаборатории, сравнения с внутрилабораторной ( $\sigma_b$ ) и межлабораторной погрешностями и изучения их стабильности [2].

Разработка методики контроля точности определения характеристик грунтов завершается оценкой периода контроля точности анализов свойств грунтов. Фактический материал охватывал 8-летний период анализов образцов в 26 инженерно-геологических лабораториях Москвы и Подмосковья. За это время была проведена 21 контрольная серия определений комплекса характеристик физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов, включающих по 75 частных определений в серии. Для каждой участвующей в эксперименте лаборатории строились контрольные карты, характеризующие изменения систематической ( $\Delta_i$ ) и случайной ( $\sigma_{bi}$ ) составляющих погрешности определения характеристик свойств грунтов во времени (рис. 3). С их помощью во всех лабораториях выявлялись величины периодов наложенного процесса оценки каждого показателя. Значения периодов находились для трех контрольных уровней, отдельно для систематической и случайной погрешностей. Для каждого контрольного уровня и составляющей погрешности строились гистограммы длительности наложенного процесса анализов характеристик грунтов (рис. 4). По гистограммам определялись периоды контроля анализа показателей свойств грунтов, обеспечивающие с вероятностью 0,85 и 0,95 обнаружение его разладки. Результаты оценки ( $\tau$ ) для показателей свойств суглинков приведены в табл. 2.

## Выводы

1. Найдены все компоненты, необходимые для организации контроля точности определения характеристик песчаных и глинистых грунтов в инженерно-геологической лаборатории, управления точностью оценки показателей свойств грунтов.

2. Случайная и систематическая погрешности измерения являются эффективными контролируемыми характеристиками точности лабораторных анализов свойств грунтов.

3. Число проб и лабораторий при определении показателей свойств грунтов с заданной точностью при доверительной вероятности 0,85 и 0,95 изменяется соответственно от двух до семи и от трех до восьми. Дальнейшее увеличение числа проб и лабораторий нецелесообразно.

4. Полученные графики (рис. 1, 2) позволяют выбрать число анализов и лабораторий, обеспечивающих требуемую точность результатов лабораторных определений, и с помощью контрольных карт (рис. 3) осуществлять периодический контроль получаемых данных.

5. Для обоснования границ регулирования могут использоваться ошибки внутри- и межлабораторной воспроизводимости.

6. Период контроля зависит от характеристики грунта, контрольного уровня и доверительной вероятности. Минимальный период контроля имеет место для границы регулирования  $\xi'''$  при  $\alpha=0,95$ , максимальный для  $\xi'$  при  $\alpha=0,85$ .

7. Случайная составляющая погрешности измерения характеристик суглинков подвержена большим колебаниям, чем систематическая. Период ее контроля для большинства показателей свойств не превышает 1 года. Для систематической составляющей, он, как правило, меньше 2 лет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев В. В. Воспроизводимость лабораторного определения некоторых показателей свойств глинистых пород. //Инж. геология. 1984. № 1. С. 100—108.
2. Дмитриев В. В., Акатова А. М., Лега Е. А. и др. Точность измерения показателей свойств песчано-глинистых грунтов в инженерно-геологической лаборатории МГРИ. // Инж. геология. 1985. № 5. С. 105.
3. Налимов В. В. Применение математической статистики при анализе вещества. М.: Физматгиз, 1960. 480 с.
4. ГОСТ 15893-77. Статистическое регулирование технологических процессов при нормальном распределении контролируемого параметра. М.: Изд-во стандартов, 1977.
5. Youden W. J. Statistical methods for chemists. N. Y.: John Wiley and Sons. Inc.; L.: Chapman and Hall, Zim., 1951. 126 p.

Московский геологоразведочный  
институт

Поступила в редакцию  
4.III.1986

**ОТ УЧЕБНЫХ ЗАДАЧ — К ПРАКТИКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА \***

В решениях XXVII съезда КПСС много внимания уделяется вопросам охраны окружающей среды, в том числе и геологической. Хозяйственная деятельность человека оказывает крупномасштабные, постоянно возрастающие воздействия на верхние слои литосферы. Например, в результате строительного производства возникают сложные природно-технические системы, включающие сооружения и часть геологической среды. Эти системы функционируют в период строительства и эксплуатации как единое целое, они существенно влияют на окружающую среду и ранее построенные объекты. К сожалению, проектирование и строительство в большинстве случаев ведутся лишь с минимальным учетом свойств геологической среды: обычно выполняются только расчеты осадки фундаментов и прочности или устойчивости грунтов основания. Неучет остальных факторов (изменение свойств грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений, изменение водно-теплового режима и т. д.) приводит к возникновению или активизации вредных геологических процессов (подтопление территорий, просадки, супфозия, оползни и др.), чрезмерным деформациям и авариям зданий и сооружений.

В настоящее время накоплен значительный опыт изучения инженерно-геологических условий с необходимой степенью детализации и создания надежных природно-технических систем, однако этот опыт реализуется крайне медленно из-за недостаточной инженерно-геологической подготовки строителей. В решениях V Всесоюзной конференции по инженерной геологии отмечалось, что улучшение инженерно-геологической подготовки строителей является важным фактором и резервом повышения качества и снижения стоимости строительства.

Строитель должен уметь заказать необходимую для расчетов инженерно-геологическую информацию, анализировать и практически использовать то, что предоставляют в его распоряжение инженер-геологи. Совместная работа специалистов этих двух направлений позволит проектировать оптимальные и надежные природно-технические системы, что в конечном итоге приведет к снижению суммарных затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию зданий и сооружений.

Особую актуальность задача улучшения качества инженерно-геологической подготовки строителей приобретает в свете решений XXVII съезда КПСС. В двенадцатой пятилетке значительные капиталовложения в производственном строительстве будут направлены на реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий. Новое строительство в значительной мере будет вестись в районах с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями (многолетняя мерзлота, заболоченность территории, сейсмические воздействия и т. д.). В первом и втором случаях необходим творческий подход для рационального проектирования новых или видоизменения сложившихся природно-технических систем.

На наш взгляд, развитию у студентов строительных специальностей навыков творческого подхода к анализу инженерно-геологической информации, умению использовать эту информацию для решения практических задач будет способствовать учебное пособие.

Будущие инженеры-строители изучают в институте лишь одну дисциплину геологического профиля, в рамках которой рассматриваются минимально необходимые строителям сведения по минералогии, петрографии, общей геологии, гидрогеологии, инженерной геологии, инженерным изысканиям. Авторам удалось в небольшой по объему книге (14 п. л.) дать задачи для всех указанных выше разделов курса.

\* Чернышев С. Н., Ревелис И. Л., Чумаченко А. Н. Задачи и упражнения по инженерной геологии. Учебное пособие для строительных специальностей вузов. М.: Высш. шк., 1984, 207 с.

Выделяется глава «Охрана геологической среды и рациональное ее использование». В ней впервые в учебной литературе по инженерной геологии сформулированы близкие к реальным задачи, которые всегда встают при проектировании сооружений в конкретных инженерно-геологических условиях, ликвидации аварий зданий и сооружений. Так, инженерно-геологические условия задачи 7.13 близки к тем, что встречаются у побережья Пицунды, а в задаче 7,6, где требуется указать мероприятия по охране древнего склепа, попавшего в пределы застройки, прослеживается ситуация, имевшая место в г. Керчи (склеп Деметры).

Задачник представляет определенный интерес и с методической точки зрения. Большинство задач многовариантны, причем варианты отличаются друг от друга не только числовым, но и смысловым содержанием. Число вариантов в однотипных задачах рассчитано на студенческую группу, что дает возможность преподавателю использовать их для проведения контрольных работ, коллоквиумов, опроса, включения в экзаменационные билеты.

Еще одна особенность задачника — наличие примеров решения типовых задач и достаточный справочный материал, вынесенный в приложения. Эти сведения полезны для студентов заочной и вечерней форм обучения, которые смогут осваивать отдельные разделы курса самостоятельно.

Наряду с безусловными достоинствами задачника в деле подготовки инженеров-строителей, отметим его некоторые недостатки. Ряд задач, например гидрогеологические расчеты, могут быть решены с помощью малых ЭВМ. Авторы такой формы решения задач не предусмотрели и примеры решения на ЭВМ не привели.

Тексты отдельных задач сильно формализованы, не привязаны к конкретной обстановке. Например, в одной из задач требуется определить число скважин, обеспечивающих заданную производительность водозабора в конкретных гидрогеологических условиях. Задача была бы гораздо понятней и интересней студентам, если ее начало сформулировать так: для обеспечения строительства промышленного предприятия в технической и питьевой воде решено использовать грунтовые воды. Определить необходимое для этих целей количество эксплуатационных скважин при заданных гидрогеологических условиях.

В главе «Инженерно-геологические изыскания» отсутствуют задачи, связанные с планированием изыскательских работ, определением потребного количества горных выработок и их глубины. Вместе с тем понимание этих вопросов чрезвычайно важно для проектировщиков.

С учетом высказанных соображений следует одобрить выпуск Минвузом СССР и издательством «Высшая школа» рецензируемого учебного пособия, которое поможет решить важную народнохозяйственную проблему рационального использования и охраны геологической среды при строительстве.

Учебное пособие «Задачи и упражнения по инженерной геологии» появляется впервые в практике строительных вузов и следует ожидать, что его использование в учебном процессе, рекомендованное программами Минвуза СССР, приведет к повышению качества подготовки инженеров-строителей.

Пашкин Е. М.

## ГЕОРГИЙ ИСАЕВИЧ ТЕР-СТЕПАНЯН

(к 80-летию со дня рождения)

В этом году исполняется 80 лет со дня рождения и 55 лет с начала научно-педагогической и общественной деятельности члена-корреспондента АН АрмССР, профессора, доктора технических наук Георгия Исаевича Тер-Степаняна — крупного ученого в области инженерной геологии и механики грунтов.

Г. И. Тер-Степанян родился 16 апреля 1907 г. в Тифлисе (ныне г. Тбилиси) в семье врача. Он окончил в 1931 г. строительный факультет Политехнического института Грузии. В 1925 г. Г. И. Тер-Степанян вступил в комсомол, с 1949 г. является членом КПСС.

Г. И. Тер-Степанян начал научную работу в 1930 г. в Закавказском институте сооружений, еще будучи студентом: он руководил оползневой группой, а затем был начальником партии по исследованию основания плотины Храмской гидростанции в Грузии. В 1931 г. Г. И. Тер-Степанян был откомандирован в Ленинград для усовершенствования в области механики грунтов. Здесь он продолжал заниматься исследованием оползней и изучением свойств грунтов стройплощадок. В 1936 г. его, как специалиста по основаниям и фундаментам сооружений, откомандировали в распоряжение Экспортстроя для работы за рубежом.

В 1939 г. Г. И. Тер-Степанян вернулся в Ленинград. Незадолго до начала Великой Отечественной войны его назначили научным руководителем исследований Лихского оползня в Грузии. Детальное изучение механизма оползней и их динамики позволило организовать службу краткосрочных прогнозов и в течение всего военного периода поддерживать движение поездов на оползневом участке магистральной дороги без снижения скорости.

В 1945 г. Г. И. Тер-Степанян возглавил отдел инженерной геологии в Институте геологических наук АН АрмССР. Позже этот отдел был преобразован в лабораторию геомеханики и переведен в Институт геофизики и инженерной геологии АН АрмССР, где Г. И. Тер-Степанян работает и в настоящее время. Научную работу он успешно совмещает с преподавательской деятельностью: сначала в Ленинградском институте инженеров коммунального строительства, затем — в Ереванском государственном университете и в Ереванском политехническом институте.

Г. И. Тер-Степанян защитил в 1939 г. кандидатскую диссертацию на тему «О внутреннем трении грунтов», в 1956 г. — докторскую диссертацию на тему «Глубинная ползучесть склонов и методы ее изучения». В 1960 г. он получил звание профессора, в 1977 г. был избран членом-корреспондентом АН АрмССР по специальности «инженерная геология».

Один из самых ярких научных результатов, полученных Г. И. Тер-Степаняном в области механики грунтов, — открытие явления скачкообразной перестройки структуры грунтов при сдвиге, ведущей к переориентации чешуйчатых частиц. Эта работа была представлена I Международному конгрессу по механике грунтов, состоявшемуся в 1936 г. в Гарварде (США). Продолжая исследования в этом направлении, Г. И. Тер-Степанян создал структурную теорию ползучести глин при деформировании. Он предложил простые графоаналитические методы определения критической высоты земляных сооружений и сложения напряжений в земляном массиве. В 1935 г. Г. И. Тер-Степанян впервые установил метастабильность структуры высокочувствительных позднеледниковых морских глин и разработал методы ее изучения. Учет этой особенности глинистых грунтов при строительстве фундаментов в Ленинградской и Мурманской областях позволил уже в конце 30-х годов отказаться от забивки свай, разрушающих естественную структуру грунтов, что дало большой экономический эффект.

Г. И. Тер-Степанян изучал свойства грунтов в местах промышленного, гидротехнического и жилищного строительства в Ленинградской и Мурманской областях, в Грузии и Армении, на Волге и на Северном Кавказе, в Чите и Иране и др., составил инженерно-геологическую карту Армении масштаба 1 : 1 000 000. Основное внимание он уделял движению земляных масс на склонах, в частности оползням. Были изучены геологические и реологические предпосылки оползания; детально исследована длительная подготовительная фаза процесса, названная глубинной ползучестью склонов, в течение которой на склонах происходят медленные деформации. Теория глубинной ползучести объясняет поведение грунтов на склонах, позволяет анализировать механизм оползней, прогнозировать оползание и вести противооползневые работы в подготовительной фазе процесса, когда воздействие на склоны наиболее эффективно. Г. И. Тер-Степанян предложил экономически целесообразный обсервационный метод борьбы с оползнями, заключающийся в последовательном осуществлении противооползневых мероприятий с параллельным ведением наблюдений за динамикой склона для контроля хода процесса его стабилизации. Им разработана детальная морфогенетическая классификация оползневых трещин и классификация оползневых деформаций зданий и сооружений. Результаты этих исследований опубликованы в монографиях «О длительной устойчивости склонов» (1961, переведена на английский язык в 1963), «Новые методы изучения оползней» (1979) и коллективных монографиях «Современные методы прогноза оползневого процесса» (1981) и «Проблемы классифицирования склоновых гравитационных процессов» (1985) и доложены на ряде международных конгрессов и симпозиумов.

Г. И. Тер-Степанян установил лавинный механизм гидродинамических (связных) селей, объясняющий их загадочное поведение действием фильтрационного давления, изучил некоторые особенности механизма земляных потоков. Он разработал методы построения годографов ползучести для анализа механизма оползней и годограмм ползучести для анализа динамики склонов.

Из работ Г. И. Тер-Степаняна в области геологии отметим обоснованное им предположение о наличии соляной тектоники в Ереване, которое позже было подтверждено при исследовании механизма погребенных оползней верхнеплиоценового времени в ущелье р. Раздан. Он изучил механизм загиба голов пластов; установил причину медленного наклонения скал в Щелинце Велком (ПНР) и указал способ устранения этого явления. Большой интерес представляет идея Г. И. Тер-Степаняна о роли ранее неизвестного геологического агента — технической деятельности человека, начавшейся в голоцене, и переходе к новому геологическому периоду — техногену, разработанная в книге «Начало пятеричного периода или техногена. Инженерно-геологический анализ» (1985).

Занимаясь проблемами гидрогеологии, Г. И. Тер-Степанян выделил и описал типы гидрогеологических поперечников в ущельях, прорезающих базальты и подстилающие их глины; разработал пьезометрический метод полевого определения вертикальной составляющей фильтрационного давления, необходимый для анализа эффективных напряжений в оползневом теле. Полученные при изучении капиллярных систем результаты позволили ему дифференцировать близкие по внешнему виду, но различно ведущие себя капиллярно-подвешенные воды, находящиеся в равновесии с окружающей средой, и висячие горизонты грунтовых вод, равновесие которых неустойчиво. Он также выявил механизм оползней, вызванных капиллярным сифонированием.

Г. Н. Тер-Степаняну принадлежит графический дифференциальный метод наблюдений за смещением оползней. Он изложен в монографии «Геодезические методы изучения динамики оползней», выдержавшей два издания (1972 и 1979) и опубликованной в ГДР.

В области прикладной математики им разработана теория цепных номограмм с прямыми линейными шкалами, позволяющая вычислять алгоритмы и составлять рациональные номограммы для функций многих переменных. Эта теория изложена в монографии «Инженерные цепные номограммы» (1965). На ее основе был предложен метод проективной анаморфозы экспериментальных кривых для получения эмпирических формул.

Г. И. Тер-Степанян участвовал в составлении русской части восьмязычного словаря по механике грунтов и фундаментостроению (Цюрих, 1967; Торонто, 1981) и международной терминологии по механике скальных пород на английском, французском и немецком языках (Лиссабон, 1975). В 1967 г. он основал сборник научных трудов «Про-

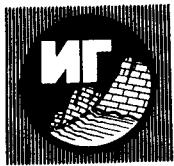
блемы геомеханики», издаваемый Академией наук АрмССР на русском, английском и армянском языках. Он является членом редколлегии журналов «Инженерная геология», «Известия АН АрмССР, Науки о Земле», «*Studia geotechnica et mechanica*» (Вроцлав) и «*Géotechnique*» (Лондон, 1957—1975). Г. И. Тер-Степаняном опубликовано 232 научные работы, из них 65 за рубежом.

Г. И. Тер-Степанян ведет большую научно-общественную работу в Научном совете по инженерной геологии и гидрогеологии АН СССР, в течение многих лет возглавляя Проблемную комиссию по оползням этого совета и являясь председателем Научного совета по инженерной геологии АН АрмССР. Он — член трех международных организаций: Международной ассоциации по инженерной геологии и ее комиссии по оползням и другим движениям масс на склонах, Международного общества по механике грунтов и фундаментостроению и его терминологической комиссии, Международного общества по механике скальных пород.

Г. И. Тер-Степаняну присуща высокая творческая активность, проявляющаяся в непрерывном стремлении решать актуальные научные и практические проблемы инженерной геологии и механики грунтов. Его эрудиция, научный и инженерный талант являются залогом новых творческих успехов в работе.

Поздравляя Георгия Исаевича с 80-летием, редколлегия журнала «Инженерная геология» желает ему крепкого здоровья, долгих лет активной творческой жизни, успехов в осуществлении своих планов.

*Редколлегия*



## Редакционная коллегия:

Главный редактор  
академик АН СССР  
Е. М. СЕРГЕЕВ

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

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

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

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

Академик ВАСХНИЛ  
Л. Г. БАЛАЕВ

Академик АН БССР  
Г. И. ГОРЕЦКИЙ

Доктор географических наук  
Н. А. ГРАВЕ

Доктор геолого-минералогических наук  
И. П. ЗЕЛИНСКИЙ

Доктор геолого-минералогических наук  
Ф. В. КОТЛОВ

Доктор геолого-минералогических наук  
В. Д. ЛОМТАДЗЕ

Академик АН УзССР  
Г. А. МАВЛЯНОВ

Доктор технических наук  
Г. А. МАРКОВ

Член-корреспондент АН СССР  
В. П. СОЛОНЕНКО

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 25.12.86      Подписано к печати 18.02.87      Т-05526      Формат бумаги 70×108<sup>1/16</sup>  
Высокая печать      Усл. печ. л. 11,2      Усл. кр.-отт. 26,6 тыс.      Уч.-изд. л. 11,6      Бум. л. 4,0  
Тираж 2323 экз.      Зак. 5112

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

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ ГОРОДОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ. Стрижельчик Г. Г. «Инженерная геология», 1987, № 2.

С позиций управления развитием геологической среды городов рассматриваются проблемы, связанные с неопределенностью в системе человек — геологическая среда. Выделяются и анализируются следующие условные виды неопределенности: природная, стратегическая, методическая, концептуальная, временная и параметрическая. Указываются пути снижения неопределенности, составляющие в совокупности основы новой методологии изысканий для градостроительства. Даны предложения по методике оценки ресурсов устойчивости геологической среды к внешним воздействиям, разработке поисковых и нормативных прогнозов, принципам оценки достоверности и точности прогнозов, сочетанию непрерывности и дискретности в прогнозировании. Показана возможность подчинения целей процедур изучения, оценок и прогнозов целям управления развитием геологической среды.

Библ. 16 назв.

УДК 624.131

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ. Зеегофер Ю. О., Батурина И. В., Лушникова Н. П. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Излагается методика проведения ретроспективного анализа состояний геологической среды на примере территории крупного города. Рассмотрены на конкретных примерах возможности анализа состояний рельефа, горных пород, гидрогеодинамической и гидрохимической обстановки, а также последствий их изменения для материально-технических объектов.

Рис. 5, табл. 2, библ. 6 назв.

УДК 624.131.1 : 624.131.24

ЦИКЛИЧЕСКАЯ НАБУХАЕМОСТЬ ГЛИН. Осипов В. И., Нгуен Нгок Бик, Румянцева Н. А. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Изучено изменение величины свободной набухаемости и давления набухания нескольких типов глин в зависимости от количества циклов их увлажнения и высушивания. Установлено, что при циклических испытаниях происходит постепенное разрушение прочных контактов между структурными элементами и их трансформация в менее прочные дальние и близкие коагуляционные контакты. Одновременно наблюдается существенная структурная перестройка глин, направленная на разрушение крупных микроагрегатов и разориентацию структурных элементов. Все это приводит к увеличению набухаемости с ростом числа циклов увлажнения, максимальное значение которой достигается при III—XX циклах и может в 1,3—10 раз быть больше по сравнению с величиной разовой набухаемости. В результате циклического набухания система достигает равновесного состояния, которому соответствует минимальное значение внутренней энергии глины и максимальное содержание связанной воды. Глина в таком состоянии характеризуется максимальной влажностью набухания  $W_n'$ , значение которой имеет важный термодинамический смысл и не зависит от первоначальной плотности и влажности грунта, а также схемы проведения циклических испытаний.

Рис. 10, табл. 1, библ. 11 назв.

УДК 624.131

ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ В' ГЛИНИСТЫХ ПОРОДАХ. Брилинг И. А., Злочевская Р. И., Волков Ф. Е., Дависилова В. И., Макеева Т. Г. «Инженерная геология», 1987, № 2.

На основе теоретических представлений и экспериментальной проверки в лабораторных и полевых условиях рассмотрены вопросы миграции щелочных растворов различной концентрации (от 0,01 до 2 н.) в водонасыщенных глинистых породах. Показаны существенная роль сорбционных процессов при взаимодействии

ствии щелочи с породой и преобладание диффузионного характера распространения щелочных растворов в слабопроникаемых водонасыщенных глинистых породах. Прогнозный расчет продвижения фронта щелочных растворов (при рН=9) от источника загрязнения с 2 н. концентрацией показал, что глинистые породы являются своеобразным геохимическим барьером для распространения щелочи.

Рис. 5, табл. 2, библ. 5 назв.

УДК 624.131.1

ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ. Зелинский И. П., Шатохина Л. Н. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Рассмотрены вопросы инженерно-геологического районирования прибрежных территорий северо-западного побережья Черного моря, типизации оползневых склонов. Выведено 14 типов инженерно-геологических разрезов, по которым выполнена оценка грунтовых условий и схематизация для целей расчетов и моделирования. Предложена методика изучения устойчивости оползневых склонов и оценка ее изменения в результате воздействия природных и антропогенных факторов.

Рис. 2, библ. 2 назв.

УДК 624.131

К РАСЧЕТУ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУР ПОЛНОЙ СКЛАДЧАТОСТИ. Печеркин А. И. «Инженерная геология», 1987, № 2.

В статье излагаются результаты математического моделирования напряженного состояния, имеющего место при растрескивании тектонических структур полной складчатости. Применяются методы теории упругости и устойчивости деформируемых систем. Результаты моделирования сопоставляются с распределением тектонической трещиноватости антиклинали Ахштырь (Западный Кавказ). Показано влияние тангенциального сжатия и нормального воздымания деформируемых толщ горных пород на распределение тектонической трещиноватости при формировании полной складчатости.

Рис. 5, библ. 9 назв.

УДК 624.131

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОРЫВОВ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ЗОНУ СДВИЖЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ БОКСИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА. Плотников И. И. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Рассматриваются инженерно-геологические и гидрогеологические условия разработки бокситов Южно-Уральского и Северо-Уральского бокситовых бассейнов. Установлено, что в связи с углублением горных выработок обостряется опасность катастрофических прорывов карстовых вод в шахты через зоны сдвижения, из подрабатываемых верхних водоносных горизонтов. Результаты изучения закономерностей формирования зоны сдвижения доказывают ее многофакторную природу. При этом высота распространения в ней вертикальных трещинных структур иногда превышает 30—40-кратную мощность извлеченного боксита при увеличении проницаемости горных пород на 3—4 порядка по сравнению с их естественным состоянием. Исследованиями установлена корреляционная связь между максимальной высотой распространения зияющих трещинных структур в зоне сдвижения, мощностью и площадью оруденения. Проведено районирование шахтного поля по степени опасности прорывов воды через зону сдвижения горных пород; рекомендованы меры по предотвращению прорывов карстовых вод.

Табл. 1, рис. 2, библ. 3 назв.

ТИПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ УРАЛА. Осипов Ю. Б., Бучкин М. Н., Аронзон М. Э. «Инженерная геология», 1987, № 2.

На примере горноскладчатого Урала рассмотрена методика регионального прогнозирования инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых. В основу работы положена идея экстраполяции условий разработки месторождений изученных горнодобывающих районов на осваиваемые и малоизученные территории региона. Изложена методика инженерно-геологической типизации разрабатываемых месторождений, основанная на парагенетическом анализе горно-геологических процессов, сопровождающих горные работы. Разработанная типологическая схема экстраполирована на территорию региона с использованием алгоритма распознавания образов, позволяющего, в частности, оценивать достоверность выполненного прогноза. Впервые построена региональная карта прогноза инженерно-геологических условий разработки полезных ископаемых крупного горнопромышленного региона.

Рис. 1, библ. 13 назв.

УДК 624.131

ОПЫТ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА Пендин В. В., Хацкевич А. Н. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Предпринята попытка установления сложности инженерно-геологических условий разработки месторождения на основе комплексной количественной оценки. Методика реализована на одном из месторождений Рудного Алтая со сложными горно-геологическими условиями. Выявлены компоненты, определяющие сложность разработки при штольневом и шахтном способах вскрытия месторождения. Для данного месторождения существенное влияние на сложность инженерно-геологических условий оказывают: обводненность выработки, коэффициент крепости заполнителя ослабленной зоны, угол встречи ослабленной зоны и расчлененность рельефа. Полученные результаты могут быть использованы для корректного подхода к инженерно-геологическому районированию месторождений подземных ископаемых и управления природно-технической геосистемой массив горных пород — выработка.

Табл. 2, рис. 3, библ. 8 назв.

УДК 624.131

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ПРИ МЕЛИОРАЦИИ ЗЕМЕЛЬ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ. Запорожченко Э. В., Дербинян Г. А. «Инженерная геология», 1987, № 2.

В статье рассмотрены некоторые научно-методические вопросы инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, связанных с обоснованием мелиоративного строительства в различных природных условиях Северного Кавказа. Проанализирован опыт изучения водопроницаемости разделяющих глинистых слоев на осушенных территориях и послепросадочного уплотнения лессовых пород. Описаны пути совершенствования инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, повышения их качества и эффективности.

Библ. 5 назв.

УДК 624.131.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТИКСОТРОПНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ. Вознесенский Е. А., Калачев В. Я., Трофимов В. Т. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Описана новая методика изучения тиксотропных свойств глинистых грунтов ненарушенного сложения при механической вибрации с помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля их прочности. Измерения проводились в исходном состоянии, в процессе вибрации и после ее прекращения без дополнительной обработки.

тельного нарушения структуры грунта различными датчиками. Приведена корреляционная зависимость, связывающая прочность изученных грунтов со скоростью распространения в них продольных ультразвуковых волн. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии так называемого мгновенного упрочнения в природных глинистых грунтах, разрушенных вибрацией, увеличении их прочности выше исходной при восстановлении, происходящем без отжатия породой влаги. В ходе процессов разупрочнения — восстановления наблюдается разрушение микроагрегатов и специфическое изменение параметров порового пространства грунтов. Сделан вывод о том, что применительно к природным грунтам ненарушенного сложения правильнее говорить о квазитиксотропном разупрочнении и упрочнении.

Табл. 2, рис. 6, библ. 18 назв.

УДК 624.131

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА НА ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛИТОСФЕРЫ ПРИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. Плотников Н. И. «Инженерная геология», 1987, № 2.

В статье изложена краткая характеристика техногенных процессов и техногенеза в целом, формирующихся при водохозяйственной деятельности человека.

Библ. 6 назв.

УДК 624.131.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ГРУНТОВ. Дмитриев В. В., Лега Е. А. «Инженерная геология», 1987, № 2.

Отсутствие контроля точности определения характеристик грунтов обуславливает неопределенность получаемой информации. Ее трудно анализировать, обрабатывать, использовать для прогноза, сложно определить необходимый и достаточный объем. Выполненные экспериментальные исследования позволили разработать процедуры контроля точности лабораторного определения характеристик песчаных и глинистых грунтов. Были найдены контролируемые величины, число необходимых для контроля проб и лабораторий, границы регулирования и периоды контроля.

Полученные данные позволяют регулировать качество лабораторной оценки показателей свойств грунтов, получать требуемую точность.

Табл. 2, рис. 4, библ. 5 назв.