ISSN 0203-0292

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

3

1987

ИЗДАТЕЛЬСТВО · НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1979 ГОДУ

3 • 1987

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

май — июнь

МОСКВА

СОДЕРЖАНИЕ

Гальперин А. М., Стрельцов В. И. Литомониторинг на железорудных карьерах КМА 3

Бондарик Г. К., Кюнтцель В. В., Пендин В. В. Возможности ландшафтно-индикационного метода при инженерно-геологических исследованиях на севере Западной Сибири 15

Гавич И. К. Особенности мелиоративных объектов и системные принципы их изучения 30

Комиссарова Н. Н., Коломийцев Н. В. Формирование просадочности лёссовых пород водного генезиса 36

Мунир Нажем Абдул, Королев В. А. Закономерности формирования потенциала влаги в лёссовых грунтах на орошаемых и неорошаемых территориях . . 43

Лебеденко Ю. П. Термодинамика и кинетика криогенного деформирования структуры порового пространства влагонасыщенных дисперсных пород . . . 50

Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Гаджиев М. Г. Напряженно-деформированное состояние массива пород при сдвиге в подстилающих отложениях 64

Кубринский Р. З. Возможные изменения свойств грунтов в пределах Тургайской ложбины 69

Гайдин А. М. Прогнозирование карстовых провалов в зонах влияния водопонижения 76

Кюнтцель В. В., Парецкая М. Н., Петренко С. И. Контроль и оценка состояния оползневых склонов в г. Москве в связи с задачами их инженерной защиты **80**

Жигалин А. Д., Локшин Г. П. Техногенное вибрационное воздействие на геологическую среду 86

Борейко Л. Г. Изучение стратиграфической последовательности лёссовых пород с применением модели марковской цепи 93

Крыжановский А. Л., Шеляпин Р. С., Хомяков В. А. Определение угла трения грунта в срезном приборе 98

Зиангиров Р. С., Кальбергенов Р. Г. Оценка деформируемости крупнообломочных грунтов 107

Новые инженерно-геологические организации 119

Обсуждаются вопросы инженерно-геологических изысканий в области вечной мерзлоты 120

Первая монография по применению инженерной геологии в строительстве . . 121

К сведению читателей журнала «Инженерная геология» 123

© Издательство «Наука»,
«Инженерная геология», 1987 г.

CONTENTS

Galperin A. M., Streltsov V. I. The lithomonitoring at the KMA ironore quarries 3

Bondarik G. K., Kyuntsel V. V., Pendin V. V. The feasibilities of the landscape-indication method for the engineering-geological studies in the North of Western Siberia 15

Gavich I. K. The specifics of the amelioration objects and system principles for their study 30

Komissarova N. N., Kolomiytsev N. V. The subsidence development in loess soils of aquatic origin 36

Munir Nazham Abdul, Korolev V. A. The regularities of the moisture potential development in loess soils on the irrigated and nonirrigated areas . . . 43

Lebedenko Yu. P. The thermodynamics and cinetics of the cryogeneous development of a pore-space structure in the water-saturated dispersed soils 50

Kalinin E. V., Panasyan L. L., Gadzhiev M. G. The stress-strain state in a rock mass at the shear of underlying deposits 64

Kubrinsky R. Z. The feasible changes in soil properties within the Turgay hollow 69

Gaydin A. M. The prediction of Karst holes in the areas subject to water decline 76

Kyuntsel V. V., Paretskaya M. N., Petrenko S. I. The monitoring and estimate of the Moscow landslide slopes state with regards of the problems of their engineering protection 80

Zhigalin A. D., Lokshin G. P. The technogeneous vibrational impact on the geological environment 86

Boreyko L. G. A study of the loess-soil stratigraphic sequence with the use of Markov-chain model 93

Kryzhanovsky A. L., Shelyapin R. S., Khomyakov V. A. The soil friction angle determination at the shear device 98

Ziantirov R. S., Kolbergenov R. G. The estimate of the coarseelastic soil deformability 107

The new engineering geological organizations 119

Deliberations on the problems of engineering geological investigations in permafrostn 120

The first monograph on the use of engineering geology in construction . . . 121

Information for the readers of the «Engineering geology» journal 123

УДК 624. 131

ГАЛЬПЕРИН А. М., СТРЕЛЬЦОВ В. И.

ЛИТОМОНИТОРИНГ НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КАРЬЕРАХ КМА

До настоящего времени при освоении природных ресурсов геологической среды в условиях бурного развития различных отраслей промышленности в нашей стране и за рубежом не учитывались в полной мере последствия изменений всего комплекса ресурсов.

Так, разрабатывая месторождения полезных ископаемых, пользователи недр до недавнего времени практически не принимали во внимание то обстоятельство, что в процессе ведения горных работ приводился в негодность почвенный покров; в результате складирования вскрышных пород создавались непригодные для народного хозяйства техногенные массивы; нарушение состояния массивов горных пород не позволяло в полном объеме извлекать полезные ископаемые из недр. Это привело к тому, что на 1985 г. в нашей стране было нарушено свыше 2,0 млн. га земель; не используется 240 млн. м^3 плодородного слоя, снятого с этих площадей [13]. Ожидается, что к 2000 г. с учетом строительства новых горно-добывающих предприятий площади земель, изъятых для несельскохозяйственных целей, достигнут 5,1 млн. га; затраты на их восстановление возрастут в 2—3 раза в связи с увеличением объема работ на горно-техническую рекультивацию техногенных массивов.

Усиление нарушения геологической среды в значительной степени вызвано увеличением объема добычи полезных ископаемых. Например, в нашей стране с 1900 по 1980 г. было добыто 5,2 млрд. т железной руды [12]. Резкий рост интенсивности освоения железорудных месторождений за 35 лет (с 1950 по 1985 г. добыча руды возросла соответственно с 48,2 до 500,0 млн. т в год) дает основание предположить, что в последние 20 лет текущего столетия будет добыто уже 12,0—14,0 млрд. т. Аналогичная тенденция характерна и для других горно-добывающих отраслей.

В пределах горного и земельного отвода горно-добывающих предприятий выделяются следующие зоны геологической среды, связанные со спецификой расположенных в них объектов (рис. 1): сосредоточения объектов горных разработок (карьеры, шахты) и отвального хозяйства (автомобильные, железнодорожные, конвейерные и гидравлические отвалы), размещения объектов переработки полезных ископаемых (обогатительные фабрики, отстойники, склады готовой продукции, хвостохранилища) и транспортных и энергетических коммуникаций, а также размещения водохранилищ. Интенсивность воздействия пользователей недр в этих зонах зависит от применяемых систем разработки.

С учетом характера изменений окружающей среды целесообразно использовать подразделение систем открытой разработки месторождений на следующие группы (по Е. Ф. Шешко) [16]: 1) бестранспортные (вскрышные породы полностью размещаются в выработанном пространстве карьеров); 2) транспортные (вскрышные породы складируются во внешние отвалы); 3) комбинированные (вскрышные породы складируются как во внутренние, так и во внешние отвалы).

В зоне горных разработок при открытом способе (рис. 2) наиболее интенсивное изменение ресурсов происходит на участках нарушения плодородного слоя (почвенного покрова), извлечения из недр основных

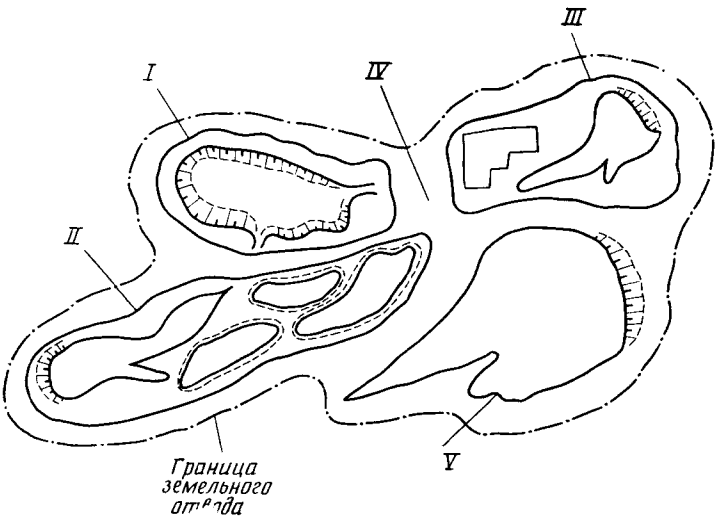


Рис. 1. Зоны геологической среды в пределах земельного отвода горно-добывающих предприятий: I — объекты горных разработок; II — объекты отвального хозяйства; III — объекты переработки полезных ископаемых; IV — транспортные и энергетические коммуникации; V — водохранилища

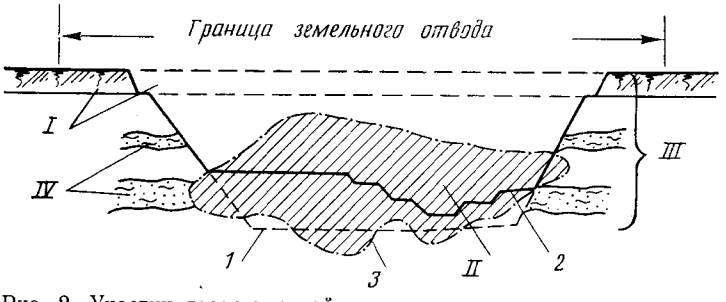


Рис. 2. Участки геологической среды в зоне открытых горных разработок: I — почвенный покров; II — участок извлечения основных и сопутствующих полезных ископаемых; III — прибортовые массивы горных пород; IV — водоносные горизонты

и сопутствующих полезных ископаемых, а также прибортовых массивов горных пород и прилегающих территорий. В зоне функционирования объектов отвального хозяйства существенные изменения геологической среды происходят на участках размещения техногенных массивов (отвалов горных пород и некондиционных полезных ископаемых), а также нарушения и восстановления почвенного покрова. Проявления антропогенного воздействия на различных участках взаимосвязаны: площадь используемых земель зависит от объема выработанного пространства; полнота извлечения полезных ископаемых из недр наряду с прочими факторами определяется параметрами карьерных откосов, которые, в свою очередь, зависят от состояния прибортовых массивов; объем поступающей в карьер воды зависит от гидрогеологических параметров и площади обнажений водоносных горизонтов и т. д. В зоне отвального хозяйства объемы техногенных массивов и их состояние определяют площади участков нарушения и рекультивации земель; технология формирования гидроотвалов влияет на сроки их рекультивации и возможность оборотного использования водных ресурсов и др.

Рациональность и эффективность использования ресурсов геологической среды — сырьевых ресурсов (включая подземные воды), почвенно-

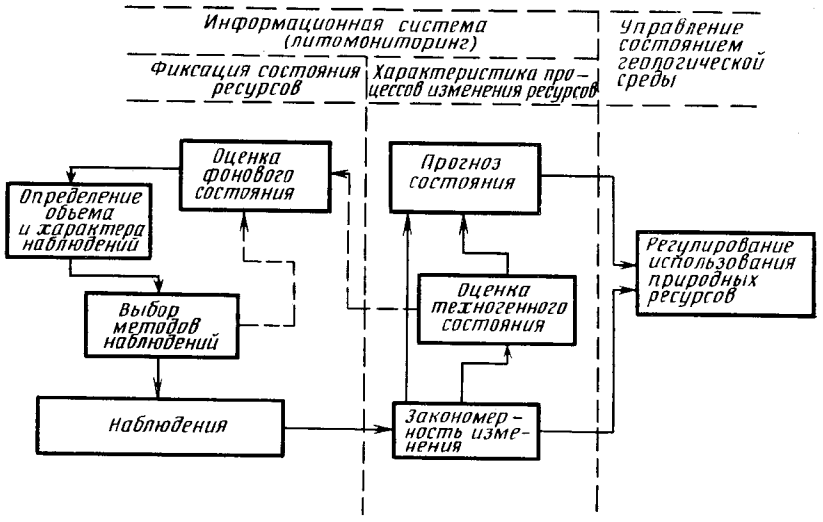


Рис. 3. Блок-схема системы литомониторинга

го покрова, массива горных пород,— основывается на знании предельно допустимой нормы их эксплуатации (ПДН). Регулирование уровня эксплуатации ресурсов, преследующее цель предупреждения (недопустимости) достижения ПДН, осуществляется путем регламентации действий пользователей недр, зафиксированной в основах законодательства Союза ССР и союзных республик о недрах, о земле, единых правилах охраны недр при разработке месторождений твердых полезных ископаемых, инструкциях о порядке предоставления горных и земельных отводов для разработки месторождений полезных ископаемых, а также в межведомственных и отраслевых инструкциях по освоению недр.

Для управления состоянием геологической среды при освоении недр недостаточно применения существующих нормативных документов, так как в них отсутствуют общеотраслевые ПДН и методы использования отдельных природных ресурсов. Это объясняется многообразием условий и специфических особенностей освоения месторождений полезных ископаемых. Для разработки ПДН необходимо изучение характера и особенностей воздействия, а также установление закономерностей изменения геологической среды, что достигается путем организации специальной информационной системы, включающей наблюдения и контроль за состоянием отдельных природных ресурсов [8, 9]. С горно-экологической точки зрения [15] работа такой системы определяется как «литомониторинг» [17]. Цель литомониторинга — получение исходных данных для оценки состояния изменяющейся геологической среды (отдельных ее зон, участков или конкретных ресурсов). Основная задача — установление закономерности изменения природных ресурсов в их фоновом или техногенном состоянии в процессе освоения недр для осуществления прогноза их трансформации и достижения ПДН в перспективе, а также разработки на этой основе рекомендаций по рациональному их использованию. На рис. 3 представлена блок-схема системы литомониторинга. Эта система включает стадии фиксации состояния характеристики процесса изменения и регулирования качества отдельных элементов (ресурсов) геологической среды. Информационная система позволяет, с одной стороны, фиксировать состояние элементов геологической среды, что достигается оценкой фонового состояния, изучением и определением объема и характера наблюдений, выбором методов и непосредственными натурными наблюдениями, с другой — давать характеристику протекающих процессов и явлений для установления закономерностей изменения,

оценки и прогноза ожидаемого состояния природных ресурсов. Характеристика этапов мониторинга приведена ниже:

I. Определение компонентов эксплуатируемой геологической среды (отдельных зон, участков или конкретных ресурсов) для рассматриваемого горно-промышленного района и оценка их фонового или техногенного количества и качества.

II. Выбор методов наблюдений (контроля) за изменениями состояния отдельных компонентов геологической среды.

III. Организация, проведение и обработка результатов натурных инструментальных наблюдений.

IV. Установление закономерностей изменения и прогноз состояния ресурсов на перспективу.

V. Сопоставление данных прогноза с ПДН и разработка рекомендаций по рациональному использованию компонентов геологической среды.

Вопросы реализации литомониторинга рассмотрим на примере наиболее показательных объектов бассейна КМА — карьера Михайловского горно-обогатительного комбината (МГОК) и гидроотвала «Березовый Лог» Лебединского горно-обогатительного комбината (ЛГОК). Строительство и эксплуатация этих объектов вызвали наибольшие затруднения в связи со значительным количеством оползневых деформаций уступов и бортов карьера МГОК (за период 1964—1985 гг. зафиксировано около 150 оползней с общим объемом свыше 4 млн. м^3) и формированием крупнейшего в стране намывного горно-технического сооружения объемом около 0,25 млрд. м^3 в непосредственной близости от г. Губкина. Многочисленные оползни в карьере МГОК приводили к аварийным ситуациям и нарушали ритмичную работу предприятия. При возведении гидроотвала «Березовый Лог» в его внутренних зонах образовался массив тонкодисперсных намывных грунтов мощностью до 75 м. Неуплотненное состояние намывного массива определило непригодность внутренних зон гидроотвала площадью около 750 га для последующего народнохозяйственного использования в течение нескольких десятилетий.

Прибортовой массив карьера МГОК

I этап. Анализ состояния участков прибортового массива проведен с использованием выполнявшейся институтом ВИОГЕМ паспортизации оползней на основе материалов геодезических и фотограмметрических инструментальных наблюдений. Фоновое состояние надрудной толщи общей мощностью около 120 м характеризуется преобладанием в ее геологическом разрезе глинистых и песчано-глинистых пород четвертичного, мелового и юрского возраста, наличием двух водоносных комплексов и погребенных ложбин стока — фиксированных поверхностей ослабления при соответствующей ориентации карьерных откосов. Типы возникавших оползней (по П. Н. Панюкову) таковы [12]: оседания (в четвертичных суглинках), собственно оползни и оползни оплывания. В процессе формирования уступов степень их устойчивости оказывала существенное влияние на использование запасов железных руд и земель в приконтурной части карьера. Техногенное состояние массива определялось уменьшением прочности пород во времени, причинами которого явились разупрочнение при снижении петростатической нагрузки по сравнению с природной, развитие реологических процессов и действие сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления. Оползневые смещения вызвали угрозу выхода из строя главной транспортной выработки — капитальной траншеи ствола № 1 подземного дренажного комплекса, создали опасность потери свыше 1 млн. м^3 богатых железных руд и нарушения земель в окрестности верхнего контура карьера. Прогноз изменений состояния прибортового массива горных пород был необходим для разработки мероприятий по рациональному использованию всех вовлекаемых в эксплуатацию ресурсов геологической среды.

II этап. Надежность прогнозных оценок устойчивости откосов и объемов извлекаемых руд обеспечивается применением эффективных методов контроля состояния бортовых массивов, включающих инженерно-геологические и инструментальные наблюдения. В качестве необходимого условия эффективности контроля рассматривается последовательная реализация следующих принципов: 1) непрерывности (в ходе многоэтапного процесса построения расчетной модели объекта уровень ее точности возрастает от этапа к этапу); 2) адаптации (расчетная модель и контрольная система взаимно приспосабливаются в соответствии с новой информацией); 3) обратной связи (эффективность контроля зависит от степени учета требований, вытекающих из предполагаемого напряженного состояния массива).

Благодаря наличию большого фактического материала оперативное определение прочности породы в бортовом массиве карьера МГОК осуществлялось преимущественно на основе обратных оползневых расчетов. При этом требовалось, чтобы данные инструментальных наблюдений позволяли в сжатые сроки производить геометризацию деформаций уступов для установления зависимостей геометрических параметров откосов от времени их существования (срока их службы). Инженерно-геологические наблюдения, включавшие полевые опытные работы с применением прессиометров и пенетрометров-крыльчаток, производились на наиболее ответственных участках, положение которых устанавливалось при обработке данных аэрофотограмметрической съемки.

Выбор аэрофотограмметрических методов наблюдений [10, 11] определили их следующие преимущества: возможность съемки практически любых участков, недоступных при применении других методов наблюдений; быстрота фиксации состояния крупных объектов (бортов карьеров и отвалов), площади которых составляют 1,0—4,0 тыс. га; высокая скорость выполнения отдельных серий наблюдений практически в любое время года и независимость их выполнения от технологических особенностей производства горных работ в карьерах и на отвалах; практическое отсутствие «мертвых зон» и высокая разрешающая способность современной съемочной и камеральной аппаратуры.

Установлено, что применительно к определению прочности пород в массиве из обратных оползневых расчетов средняя квадратическая ошибка съемки оползней в плане и по высоте может составлять 0,4—0,5 м. Такая точность обеспечивается использованием графических материалов, составленных по данным аэрофотосъемки.

III этап. Проведенные инструментальные маркшейдерские и инженерно-геологические наблюдения состояния прибортовых массивов позволили выявить участки, подверженные оползневым деформациям, и провести их геометризацию. Планы поверхностей скольжения (их видимой и невидимой, т. е. перекрытой оползневыми массами, частей) составлялись по результатам аэрофотосъемки. Составление плана поверхности скольжения производилось на основе фиксирования на фотоснимках положений характерных точек до и после оползня и последующего построения по ним векторов смещения, по которым отстраивалась сама поверхность. Вектора смещений определялись без проектирования и организации громоздких наблюдательных станций и выполнения специальных маркшейдерских работ с применением теодолита и нивелира. Аэрофотограмметрические съемки производились по всем прибортовым массивам карьеров общей площадью свыше 3,0 тыс. га и позволили только в течение 1976—1979 гг. геометризовать свыше 50 крупных оползней.

Дешифрирование аэрофотоснимков обеспечило выявление зон зарождения оползней и создание основы для инженерно-геологического районирования карьерного поля. Аэрофотосъёмочные работы дополнялись инструментальными наблюдениями за деформациями уступов в четвертичных суглинках, апт-неокомских и волжско-келловейских глинах, а

Расчетные характеристики структурно-механических параметров глинистых пород прибортового массива карьера МГОК

Порода	c_0, МПа	c_∞, МПа	φ, град	$T_р$, годы	$\eta_р$, МПа/сут/мм	δ
Суглинки четвертичные	0,045 / 0,032	0,020 / 0,010	29 / 24	0,142 / 0,142	0,0267 / 0,0055	0,85 / 0,734
Глины апт-неокомские	0,043 / 0,026	0,01 / 0,002	20 / 14	0,369 / 0,118	0,0284 / 0,03	0,94 / 1,0
Глины волжско-келловейские	0,075 / 0,050	0,024 / 0,018	16 / 12	— / 0,207	0,0162 / 0,015	1,0 / 0,823
Глины батские	0,13	0,08	22	0,186	0,0115	1,0

также зондированием четвертичных суглинков пенетрометром-крыльчаткой и прессиометрическими испытаниями (комплексом Д-76 конструкции НИИОСП), позволившими установить условно-мгновенные (в начальный период после оформления уступов в оползнеопасных зонах) значения сцепления c_0 и угла внутреннего трения φ_0 всех разновидностей глинистых пород бортового массива.

IV этап. Результаты съемок оползней и инструментальных наблюдений за деформациями уступов использованы для определения параметров длительной прочности глинистых пород прибортового массива к сдвиговой ползучести из обратных расчетов. Прогноз сдвиговых деформаций и сопротивления глинистых пород сдвигу выполнялся с помощью соотношений структурной механики грунтов [7, 10]. На основании данных натурных испытаний и обратных расчетов оползней установлены параметры (c_0, c_∞, $T_р$) зависимостей сцепления c от времени $t_р$ вида (при этом принимается $\varphi = \text{const}$):

$$c = c_0 - (c_0 - c_\infty)\frac{t_р}{T_р + t_р}. \qquad (1)$$

По графикам смещений реперов (или характерных точек на поверхности уступов) во времени определены скорости установившейся ползучести $\dot{u}_т$ и разрушения $\dot{u}_р$, по значениям которых получены параметры сдвиговой ползучести δ, $\eta_т$, $\eta_р$ из выражений вида:

$$\frac{\dot{u}_т}{\tau} = \frac{\bar{\tau}^\delta}{\eta_т}, \quad \frac{\dot{u}_р}{\tau} = \frac{\bar{\tau}^\delta}{\eta_р}, \qquad (2)$$

где $\bar{\tau} = (\tau - \tau_\infty)/(\tau_0 - \tau)$ — уровень касательных напряжений, τ — действующее касательное напряжение; τ_0, τ_∞ — условно-мгновенное и предельно длительное сопротивление сдвигу

$$(\tau_0 = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c_0;\ \tau_\infty = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c_\infty).$$

В таблице представлены результаты определения (расчетные характеристики) структурно-механических (реологических) параметров глинистых пород прибортового массива с учетом влияния погребенных ложбин стока и литологических контактов (нарушенные зоны). В числителе и знаменателе приводятся соответственно характеристики для ненарушенных и нарушенных зон. Оценка реологических параметров глинистых пород с учетом наличия нетектонических нарушений условий залегания надрудной толщи позволила получить исходные данные для инженерно-геологического районирования карьерного поля по условиям длительной устойчивости откосов [3].

Как следует из выражения (1) и данных натурных испытаний, предельно длительные значения сопротивления сдвигу рассмотренных разновидностей глинистых пород достигаются за периоды 2—10 лет после формирования уступов. Установлено, что для зон прибортового массива, приуроченных к обводненным литологическим контактам или погребенным ложбинам стока, интенсивность процессов снижения прочности и развития сдвиговых деформаций возрастает в 2—3 раза.

С помощью выражений (1), (2) построены номограммы для определения геометрических параметров уступов (высоты $H_у$ угла наклона откоса α) в зависимости от срока их службы t (рис. 4) с использованием графика ВНИМИ для расчета плоских откосов [10], а также графики критических (разрушающих) скоростей сдвиговых деформаций для реперов или характерных точек на поверхности откоса в виде $\dot{u}_р = f(\sigma_n, \tau)$, где σ_n и τ — соответственно нормальное и касательное напряжения по площадкам скольжения, соответствующим указанным точкам на откосе.

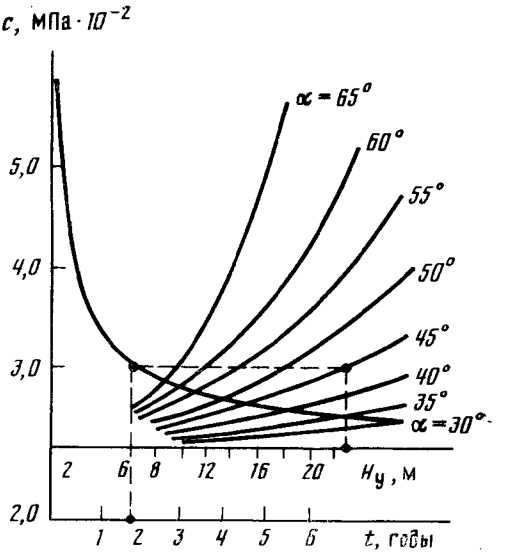


Рис. 4. Номограмма для определения геометрических параметров (α, $H_у$) и времени t устойчивого состояния уступов в келловейских глинах

V этап. Использование надежных исходных данных позволило уменьшить нормативные коэффициенты запаса устойчивости на 15—20% и определить рациональные параметры уступов, обеспечивающие требуемые сроки их безопасной эксплуатации. Для уступов нерабочего (восточного) борта карьера обосновано увеличение крутизны на период, необходимый для извлечения непромышленных (находящихся за пределами проектного контура) запасов богатых железных руд. После извлечения дополнительного объема руды предложено выполнить пригрузку борта отвалом окисленных кварцитов. Внедрение разработанных рекомендаций обеспечило извлечение 2 млн. т богатой железной руды, сокращение объема вскрышных работ на 3 млн. м³, предотвращение нарушения свыше 10 га земель с общим экономическим эффектом свыше 12,0 млн. руб.

Намывной массив гидроотвала Лебединского ГОКа

I этап. Состояние массива крупнейшего гидроотвала «Березовый Лог» характеризуется наличием в его разрезе разнородных намывных грунтов: песков, суглинков, мело-мергелей, глин. Консистенция тонкодисперсных грунтов изменяется от текучей до мягкопластичной [6]. Формирование техногенного геологического тела, максимальная мощность которого на 1985 г. достигла 75 м, начато в 1964 г. в сухой балке, дно и склоны которой сложены четвертичными, преимущественно глинистыми отложениями, перекрывающими толщу туронского мела. На отдельных участках территории мел выходит на поверхность. Четвертичные отложения и мел, как правило, перекрываются почвенно-растительным слоем мощностью от нескольких десятков сантиметров до 1,5—2 м, мощность частично гумусированных суглинков изменяется от 0,7 до 8 м. Упорная призма (ограждающая дамба) намывалась из песка (с опережением по

высоте) первоначально (до 1968 г.) по односторонней, а затем по двусторонней схеме. Намыв тонкодисперсных грунтов осуществлялся из торцов пульповодов, расположенных на упорной призме. Разнородность намываемых грунтов, различная продолжительность намыва, изменение в широких пределах ширины пляжной зоны и местоположения выпуска пульпы обусловили слоистое, неоднородное в плане и профиле строение гидроотвала. Для анализа структуры тела гидроотвала и влияния структурно-формирующих факторов может использоваться подход, разработанный в Воронежском государственном университете [1]. При общей площади гидроотвала около 1000 га к 1975 г. доступными для рекультивационного оборудования были лишь упорная призма и частично пляжная зона общей площадью около 200 га.

Оперативная оценка состояния намывного массива обеспечивала решение следующих практических задач: создание безопасных условий эксплуатации откосных сооружений, ограждающих неконсолидированную толщу разнородных тонкодисперсных грунтов; инженерно-геологическое обоснование мероприятий по форсированию консолидации и повышению несущей способности намывного массива при совместной гидроукладке тонкодисперсных и раздельнозернистых грунтов; промышленное внедрение природоохранной технологии формирования намывных массивов, позволяющей повысить емкость, ускорить рекультивацию гидроотвала, интенсифицировать водооборот; увеличение площадей, пригодных для сельского и лесного хозяйства, за счет создания территорий горизонтальной планировки на месте овражно-балочных участков.

II этап. Для решения перечисленных задач необходимо использовать комплекс методов наблюдений, позволяющих выполнять оперативную оценку устойчивости откосных сооружений, устанавливать границы зон намывного массива, определять механические свойства грунтов и несущую способность труднодоступных зон гидроотвала. Этим требованиям удовлетворяют методы натурных наблюдений, предусматривающие создание стационарной системы датчиков-пьезодинамометров в теле и основании упорных призм, использование зондов, обеспечивающих одновременное получение данных о величине порового давления и сопротивления сдвигу водонасыщенных тонкодисперсных грунтов, а также проведение аэрофотосъемки намывных сооружений [4, 5]. Аэрометоды позволяют выполнять инженерно-геологическое районирование намывных территорий по фотосхемам, производить оценку состояния откосов упорных призм и определять осадки намывных массивов с использованием метода аналитической фототриангуляции [5, 11].

III этап. Для оперативного дистанционного контроля устойчивости откосных сооружений гидроотвала применялась система стационарных датчиков-пьезодинамометров, заложенных по вероятной поверхности скольжения в основание дамбы, тело дамбы и приоткосную зону намывного массива. В раздельнозернистых грунтах датчики позволили определить пьезометрические уровни, в тонкодисперсных — произвести замер порового давления. После установления датчиков и снятия первой серии показаний производился расчет устойчивости откосов с использованием натурных данных о физико-механических показателях свойств грунтов. Затем выполнялись расчеты устойчивости для вариантов, соответствующих различным положениям депрессионной кривой и степеням уплотнения слоев глинистых пород, которые принимались выше или ниже установленных при первичных замерах. На основании результатов расчетов строились графики $\eta = f(S_{PW})$ (S_{PW} — площадь эпюры давления воды по поверхности скольжения) для определения коэффициентов запаса устойчивости откосов непосредственно на наблюдательном посту путем обхода измерительных точек на коммутаторе приемного устройства — частотомера (например, ПЦП-1) и подбора соответствующих вариантов по графикам.

Оптимизация сети инженерно-геологического опробования и уточнения границ участков осуществлялись на основе данных аэрофотосъемки (фотосхем) гидроотвала, систематически выполняемой с 1976 г. Результаты инженерно-геологического районирования использованы при разработке спецтехнологии намывных работ [6]. Перечисленные методы наблюдений используются также на гидроотвале ЛГОК в балке Чуфичева, где складируются намывные меловые грунты.

Для контроля за состоянием труднодоступных зон гидроотвалов предложен способ дистанционного определения несущей способности намывного массива по данным аэрофотограмметрической съемки, в соответствии с которым допустимая нагрузка $P_{доп}$ определяется в зависимости от относительной осадки массива $\Delta h/h$ [5]. Инструментальные наблюдения выполнялись институтом ВИОГЕМ с использованием метода аналитической фототриангуляции, позволяющего определять координаты точек недоступных участков гидроотвала бесконтактным способом. Аэрофотосъемки производились в моменты начала и окончания периода t_0 в намыве («отдыха» гидроотвала).

Эталонные зависимости $P_{доп}=f[\Delta h(t_0)/h]$ устанавливаются с использованием решения задачи уплотнения намывного слоя в период его «отдыха» t_0, из которого определяется степень уплотнения слоя $U=\psi(t_0)$. Через степень уплотнения по эмпирическим зависимостям определяются характеристики сопротивления сдвигу c и φ. С использованием формулы Прандтля — Рейснера по значениям $c(U)$ и $\varphi(U)$ определяется предельная критическая нагрузка на намывное основание $P^{кр}_{пр}$, а затем $P_{доп}=P^{кр}_{пр}/\eta$ [2].

При съемках в первой секции гидроотвала «Березовый Лог» точность определения осадков характеризовалась средней квадратической погрешностью порядка ± 5 см. Результаты аэрофотосъемки показали достаточно хорошую сходимость с данными наземной съемки и расчетами (расхождения не превысили 10%).

IV этап. По данным замеров порового давления и осадок установлены значения приведенного коэффициента сжимаемости и коэффициента консолидации с учетом реальных условий массива гидроотвала. Выявлен характер изменчивости параметров нелинейной консолидации и сопротивления сдвигу для намывных глинисто-меловых масс в пределах приоткосной и внутренних зон гидроотвала. На основании данных стационарного контроля устойчивости откосных сооружений с помощью системы датчиков (пьезодинамометров) и зондирования глинисто-меловых линз в теле упорной призмы и грунтов ее основания разработаны и внедрены следующие мероприятия: создана берма шириной 100 м на отметке 202 м (отметки заполнения гидроотвала на 1985 г.— 222—224 м); оборудованы 2-ярусные горизонтальные дренажи и горизонтальные дренажные скважины; выполнена намывом песчаная пригрузка низового откоса на северо-западном участке упорной призмы.

Установлено, что без применения спецтехнологии формирования гидроотвала для уплотнения тонкодисперсных грунтов секции, где максимальная мощность намывной толщи составляет 75 м, потребовалось бы свыше 30 лет.

После опытной проверки предложенного дистанционного способа контроля состояния намывных массивов полученные с его помощью данные использованы при установлении зависимостей несущей способности различных зон гидроотвала от относительных осадок и времени «отдыха» (рис. 5, 6).

V этап. Для форсирования консолидации намывного массива предложена технология формирования гидроотвала, предусматривающая создание в массивах тонкодисперсных грунтов системы гидравлически связанных намывных дренажных элементов — призм, линз и подушек [6].

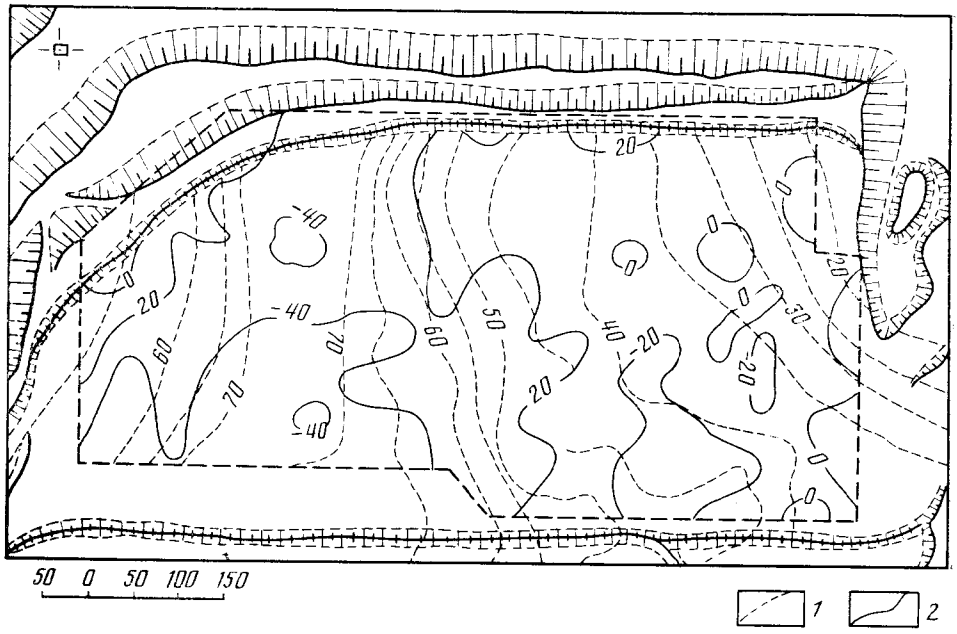


Рис. 5. План первой секции гидроотвала «Березовый Лог»: *1* — изолинии мощности намывного массива, м; *2* — изолинии осадок, см

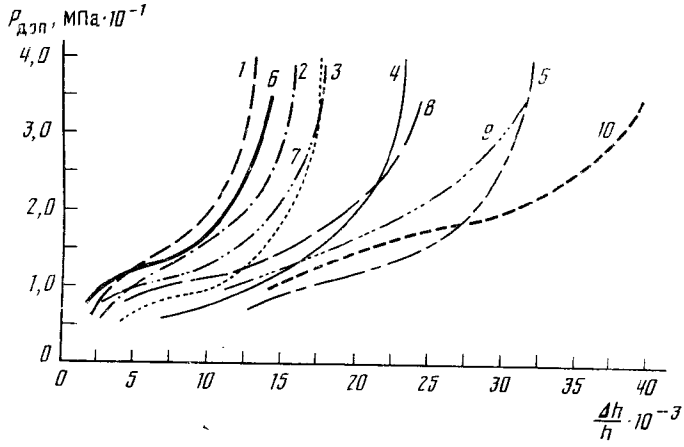


Рис. 6. Графики определения несущей способности $P_{доп}$ намывных глинисто-меловых грунтов гидроотвала «Березовый Лог»: *1—5* — кривые для грунтов I секции, построенные для периодов после окончания намыва, равных соответственно 1, 2—3, 5 и 10 лет; 6—10 — то же, для грунтов II секции

Прогноз и контроль уплотнения тонкодисперсных грунтов в пределах различных участков ядерной зоны с учетом влияния дренажных элементов позволили выполнить корректировку объема гидроотвала «Березовый Лог» и обосновать увеличение его общей емкости с 220 до 250 млн. м³. Для предупреждения эрозионных процессов на восстановленной территории отметки заполнения гидроотвала определены с учетом осадок намывного массива. Общий экономический эффект, достигнутый в 1973—1985 гг. при формировании в балке «Березовый Лог» уникального намывного горно-технического сооружения многоцелевого назначения с общим объемом уложенных материалов около 250 млн. м³

за счет сокращения дальности транспортировки гидровскрыши и отходов обогащения, экономии водных ресурсов, уменьшения затрат на горно-техническую рекультивацию и сокращения сроков возврата намывных территорий для дальнейшего народнохозяйственного использования, составил около 18 млн. руб.

Опыт литомониторинга техногенных намывных массивов использован при формировании нового гидроотвала меловых грунтов карьера ЛГОК, где в 1985 г. начато создание системы песчаных дренажных элементов, и на гидроотвалах карьеров Кузбасса, на которых в качестве фильтрующих материалов используются отходы углеобогащения на крутонаклонных сепараторах.

Заключение

1. Реализация литомониторинга на железорудных карьерах КМА позволяет не только фиксировать воздействие пользователей недр на отдельные зоны и участки геологической среды, но и рационально использовать все вовлекаемые в эксплуатацию природные ресурсы.

2. Рассмотренные методы оперативного дистанционного контроля изменения геологической среды позволили выполнить геометризацию оползневых тел, получить реологические характеристики глинистых пород в пределах карьерного поля, установить зависимости геометрических параметров откосов от срока их службы, определить осадки отвальных массивов и дать оценку во времени несущей способности труднодоступных участков гидроотвалов.

3. Применение эффективных методов контроля и прогноза состояния бортовых и отвальных массивов обеспечило разработку мероприятий, в результате внедрения которых увеличена полнота извлечения железных руд, сокращены объемы вскрышных работ, значительно (примерно на 15%) возросла емкость крупнейшего в стране гидроотвала, осуществлена ускоренная его рекультивация и создана территория горизонтальной планировки на месте малопригодных овражно-балочных участков. Накопленный опыт литомониторинга в бассейне КМА может быть использован на карьерах различных горно-добывающих отраслей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вахтанова А. Н., Черняев В. Ф., Литвинова В. М.* Управление техногенным литогенезом при разработке полезных ископаемых открытым способом//Инж. геология. 1986. № 1. С. 23—31.
2. *Гальперин А. М., Шафаренко Е. М.* Реологические расчеты горно-технических сооружений. М.: Недра, 1977. 247 с.
3. *Гальперин А. М., Сунил Алой Перера, Д. Труммер, Р. Харлас.* Управление инженерно-геологическими процессами при формировании бортов карьеров КМА//Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1984. № 11. С. 57—63.
4. *Гальперин А. М.* Устройство для комплексного зондирования водонасыщенных грунтов. А. с. 1174525 СССР//Б. И. 1985. № 31.
5. *Гальперин А. М., Зайцев В. С., Марченко С. М. и др.* Способ контроля состояния намывных массивов. А. с. 1188322 СССР//Б. И. 1985. № 40.
6. *Дмитриев А. П., Гальперин А. М.* Инженерно-геологическое обоснование мероприятий по управлению процессами уплотнения намывных массивов//Инж. геология. 1983. № 4. С. 40—50.
7. *Зарецкий Ю. К., Вялов С. С.* Вопросы структурной механики глинистых грунтов// Основания, фундаменты и механика грунтов. 1971. № 3. С. 1—5.
8. *Захаров Ю. Ф.* Инженерно-геологический мониторинг строительного и промышленно-хозяйственного освоения равнинных территорий//Инж. геология. 1986. № 1. С. 3—16.
9. *Израэль Ю. А.* Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометиздат, 1979. 375 с.
10. *Ильин А. И., Гальперин А. М., Стрельцов В. И.* Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах. М. Недра, 1985. 248 с.

11. Методические указания по применению аэрофотограмметрии для маркшейдерских наблюдений за деформациями земной поверхности, бортов карьеров, и отвалов. Белгород: Изд-во ВИОГЕМ, 1983. 38 с.
12. Народное хозяйство СССР в 1983 г. Статистический ежегодник (разд. Природные ресурсы и охрана окружающей среды). М.: Финансы и кредиты, 1984. С. 396—406.
13. *Нуриев З. Н.* О соблюдении требований законодательства об охране природы и рациональном использовании природных ресурсов.//Правда. 1985. 3 июля.
14. *Панюков П. Н.* Инженерная геология. М.: Недра, 1978. 296 с.
15. *Певзнер М. Е.* Горная экология — новое направление в горной науке//Тр. ГИГХС. Вып. 41. Ч. 1. М., 1977. С. 6—11.
16. *Ржевский В. В.* Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М.: Недра, 1980. 631 с.
17. *Стрельцов В. И.* Литомониторинг при пользовании недрами//Тр. ВИОГЕМ. 1985. С. 3—9.

Московский горный институт
ВИОГЕМ

Поступила в редакцию
23.VII.1986

УДК 624.131.31

БОНДАРИК Г. К., КЮНТЦЕЛЬ В. В., ПЕНДИН В. В.

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАНДШАФТНО-ИНДИКАЦИОННОГО МЕТОДА ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Оценка качества частных ландшафтных индикаторов

В практике инженерно-геологических исследований широко используется ландшафтно-индикационный метод (ЛИМ), существенно расширяющий возможности применения аэрокосмофотоматериалов (АКФМ) при картировании [1, 2, 8, 9]. Под индикацией здесь понимается распознавание или оценка некоторого признака объекта, не поддающегося прямому наблюдению, по другому признаку (признакам), явно проявляющемуся на земной поверхности и отчетливо выраженному на АКФМ и топографических картах.

ЛИМ базируется на понятии о природно-территориальном комплексе (ПТК). ПТК — целостная, упорядоченная в пространственно-временном отношении композиция взаимодействующих компонентов био-, атмо-, гидро- и литосферы. Взаимосвязи между этими компонентами имеют вероятностный характер. Общепринятая классификация ПТК отсутствует. Наиболее известной следует считать иерархическую схему ПТК разных категорий: ландшафт — местность — урочище — фация. Ландшафт можно определить как парагенетическую ассоциацию урочищ, занимающих связную область пространства, граница которой, в первом приближении, отвечает границе распространения генетического типа пород (или стратиграфо-генетического комплекса). Местности — части ландшафта, различающиеся между собой по характеру расчлененности рельефа. Урочище представляет собой генетическую ассоциацию фаций внутри границ геоморфологического элемента, выраженного в рельефе некоторой мезоформой. Фация — это элементарный ПТК. Его характеризуют следующие признаки: однородность минерального состава почвообразующих пород зоны аэрации, однородность почвы (единая почвенная разность), единство фитоценоза, развитого в пределах единой формы микрорельефа [1, 3, 12].

Анализ определений ПТК различных категорий показывает, что четкие и недвусмысленные критерии их выделения пока не разработаны. Отсутствие однозначных признаков (как частных, так и системообразующих) ПТК различных категорий является причиной известного субъективизма в их выделении, поскольку приходится оперировать комбинаторными границами, проводимыми на глаз, на основе анализа внешних компонентов ПТК, например, таких, как растительность или строение рельефа. Не существует единства взглядов и относительно границ ПТК в вертикальном направлении. За верхнюю границу принимают обычно параллельную поверхности земли плоскость, секущую атмосферу несколько выше наземной части растительного покрова и выделяющую ее приземный слой, оказывающий активное влияние на формирование и функционирование ПТК. Нижней границей часто считают поверхность,

Индикаторы (внешние компоненты ПТК)		Индикаты (внутренние компоненты ПТК)	
Растительность	Древесный ярус Травяно-кустарничковый ярус Мохово-лишайниковый ярус	Вещественный состав, состояние и свойства пород Условия залегания пород (мощность, элементы залегания)	Геологическое строение
Рельеф	Элементы макрорельефа (геоморфологический уровень) Элементы мезорельефа Элементы микрорельефа	Области питания, разгрузки, направление движения Уровень и напор подземных вод Химический состав подземных вод	Гидрогеологические условия
Гидрографическая сеть	Речная сеть Заозеренность		
Проявления ЭГП	Пораженность экзогенными геологическими процессами	Распространение и температура многолетнемерзлых пород Глубина сезонно-талого (сезонно-мерзлого) слоя	Мерзлотные условия
Компоненты искусственного происхождения	Пашни, гари, дороги, другие сооружения, проявления инженерно-геологических процессов		

Рис. 1. Внешние и внутренние компоненты ПТК

отделяющую от литосферы ее верхнюю часть, взаимодействующую с внешними компонентами ПТК. Следовательно, внутри границ ПТК возможна индикация его внутренних компонентов по внешним компонентам. Глубина индикации оценивается в пределах 15—20 м [2].

Ландшафтными индикаторами являются рельеф, проявления экзогенных геологических процессов (ЭГП), гидрографическая сеть, растительность. Объект индикации (индикат) — внутренние компоненты ПТК: вещественный состав пород, условия их залегания и свойства, гидрогеологические условия. Перечень внешних (индикаторов) и внутренних (индикатов) компонентов ПТК приведен на рис. 1.

Качество ландшафтной индикации характеризует достоверность и точность. Под достоверностью индикации следует понимать вероятность правильного распознавания некоторого признака ПТК. При количественной оценке признака путем индикации ее достоверность есть вероятность нахождения полученной в результате индикации величины признака в интервале заданной точности. Под точностью индикации следует понимать величину отклонения полученной оценки признака от его оценки, основанной на прямом измерении. Заданная точность определяется величиной максимально возможного допустимого отклонения оценки индицируемого признака от его оценки, полученной в результате прямых измерений. Заданная точность должна регламентироваться нормативными документами. Меру точности индикации показателя признака Y—δ_Y возможно получить по формуле

$$\delta_{Y_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_i - Y_i')^2}{n-1}},$$

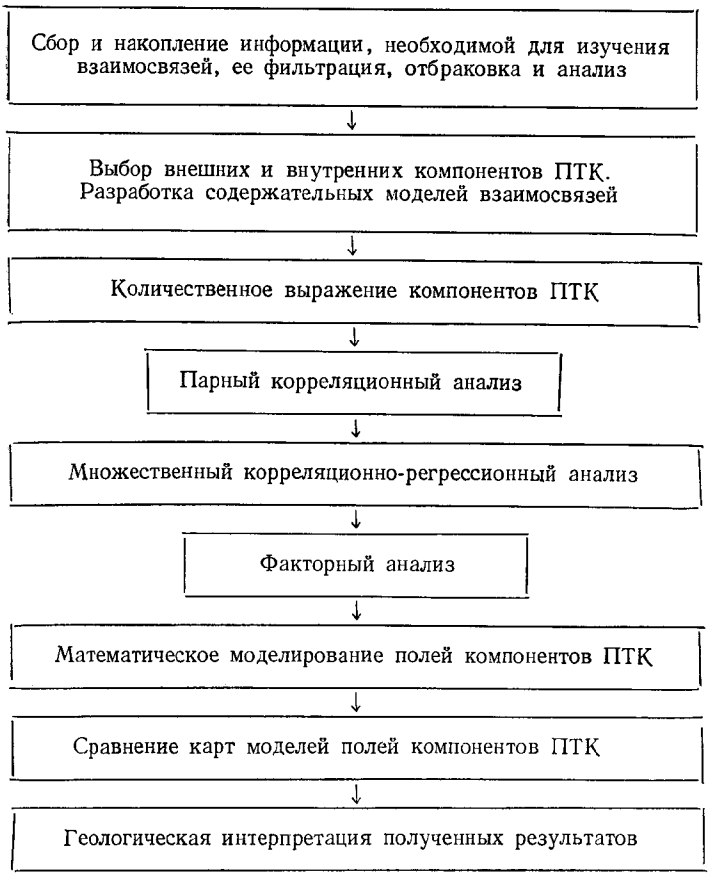


Рис. 2. Схема операций по выявлению структуры взаимосвязи компонентов ПТК

где Y_i и Y_i' — соответственно непосредственно измеренная и полученная в результате индикации оценка признака; n — объем выборки (число пар сравниваемых оценок). Достоверность (вероятность индикации) оценивают в случае соблюдения неравенства $\Delta Y_i \leqslant \delta_{Y_t}$, где $\Delta Y_i = Y_i - Y_i'$. За пределами интервала $\pm\delta_{Y_t}$ оценка Y_i' не отвечает заданной точности.

Методика среднемасштабной инженерно-геологической съемки, основанной на использовании информации, полученной на ключевых участках — эталонах, заключается в экстраполяции данных за их границы. При экстраполяции опираются на комплексные ландшафтные индикаторы, в качестве которых нередко применяют пространственную композицию набора внешних признаков ПТК категории «урочище». Научно обоснованное и эффективное использование комплексных ландшафтных индикаторов подобного типа (могут быть и другие) предполагает последовательную реализацию двух условий: 1) выявление структуры взаимосвязи внешних и внутренних компонентов урочища; 2) разработка (на базе структуры взаимосвязи) корректных критериев, обеспечивающих строгое и единообразное выделение ПТК категории «урочище» различными исполнителями. Критерии должны обеспечивать типологический для конкретной ландшафтной провинции подход к выделению урочищ. Схема операций по выявлению структуры взаимосвязи компонентов ПТК показана на рис. 2. Исходную информацию отбирают и накапливают в процессе проведения съемочных работ и в ходе предварительной проработки литературных и фондовых материалов. Данные подвергают

фильтрации, отбраковке и первично обрабатывают. В процессе последующего анализа обосновывают выбор внешних и внутренних компонентов ПТК, взаимосвязь которых предполагается выявить. Важным этапом является разработка содержательных моделей взаимосвязи компонентов ПТК на основе представлений о процессе его формирования и функционирования. Далее подбирают количественные показатели, наилучшим образом характеризующие компоненты ПТК. Выбор этих показателей заключается в критическом рассмотрении существующих количественных характеристик и в случае необходимости в разработке новых. Авторы подчеркивают недопустимость использования балльных оценок, которым присущи недостатки качественных характеристик (субъективизм в восприятии и отображении информации).

Представленную в количественной форме информацию подвергают статистической обработке. С целью установления тесноты взаимосвязи между компонентами ПТК проводят парный корреляционный анализ. Он включает расчет парных и частных коэффициентов корреляции. Однако опыт показывает, что для достоверной индикации парных взаимосвязей оказывается недостаточно. Поэтому для прогноза отдельных компонентов инженерно-геологических условий нами использовались уравнения множественной регрессии. В правую часть уравнений входят комплексные ландшафтные индикаторы, с помощью которых можно количественно оценить индикаты с заданной точностью и доверительной вероятностью. Примеры подобных комплексных индикаторов помещены ниже. Факторный анализ не является обязательным этапом предлагаемой методики. С его помощью можно более детально исследовать внутреннюю структуру ПТК; его результаты позволяют корректно подойти к типизации и выделению ПТК разных категорий.

Помимо общей оценки необходимо выявить пространственную структуру взаимосвязи компонентов ПТК. Последняя необходима для обоснованного составления проектов инженерно-геологических исследований и палеогеографических реконструкций. Для этого необходимо провести сравнение тренд-поверхностей параметров компонентов ПТК. Такое сравнение можно осуществить путем построения карт сходства и корреляцией одних только полиномиальных коэффициентов аппроксимирующих уравнений.

Геологическая интерпретация результатов завершает любой этап математической обработки материалов. Она позволяет критически осмыслить полученные результаты, проверить их непротиворечивость содержательным моделям.

Рассмотренная методика реализована в районе лесотундровой зоны севера Западной Сибири. Съемка территории проведена ВСЕГИНГЕО [4]. Район расположен в зоне сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород (ММП). На его территории выделяются ландшафты: поймы, надпойменных террас, III озерно-аллювиальной равнины северной и южной лесотундры (IIIIaСЛТ, IIIIaЮЛТ), IV озерно-аллювиальной равнины южной лесотундры (IVIaЮЛТ), IV прибрежно-морской равнины северной лесотундры (IVpmСЛТ). Связи между ландшафтными индикаторами и компонентами инженерно-геологических условий изучены в пределах ландшафта III и IV равнин северной и южной лесотундры, имеющих наиболее широкое распространение в районе. III и IV озерно-аллювиальные равнины сложены преимущественно песчаными отложениями верхнечетвертичного возраста, IV прибрежно-морская равнина — песчано-глинистыми отложениями того же возраста.

По каждому ландшафту исходный материал (после отбраковки и предварительной обработки) представлен в виде количественных оценок компонентов, сгруппированных в таблицы. В них помещены:

Показатель компонентов ПТК, их индекс, единица измерения	Компонент ПТК
Сомкнутость крон, СК, доли единицы Высота деревьев $H_д$, м	Древесный ярус
Проективное покрытие, ППК, доли единицы Высота кустарничков $H_к$, м	Травяно-кустарничковый ярус
Проективное покрытие, ППМ, доли единицы	Мохово-лишайниковый ярус
Высотные отметки $H_{абс}$, м Превышения над местными базисами эрозии ΔH, м Крутизна поверхности α, град Уклон поверхности $\operatorname{tg}\alpha$, безразмерная величина Экспозиция поверхности β, град	Элементы мезорельефа
Покрытие кочками (кочковатость) K_s, доли единицы Покрытие пятнами-медальонами M_s, доли единицы Высота кочек K_h, м Размер пятен-медальонов M_R, м	Элементы микрорельефа
лубина сезонно-талого слоя $h_{стс}$, м Температура пород в зоне постоянных годовых амплитуд $t°$, град	Мерзлотные условия
Коэффициенты дисперсности отложений в соответствующих интервалах глубин [11]: $C_{d_{0-2}}$, $C_{d_{2-4}}$, $C_{d_{4-6}}$, $C_{d_{6-8}}$, $C_{d_{8-10}}$ (интервалы глубин (в м) приводятся в нижней части индекса), безразмерная величина Влажность пород сезонно-талого слоя $W_{стс}$, безразмерная величина Влажность подстилающих пород $W_в$, безразмерная величина Мощность отложений торфа, $H_т$, м	Геологическое строение

Показатели внешних компонентов ПТК подсчитывались на площади размером 10×10 м для незалесенных участков и 20×20 м — для залесенных, а показатели внутренних компонентов ПТК — по результатам буровых работ, проведенных в центре площади.

Составление содержательной модели формирования и функционирования ПТК проиллюстрируем на примере ландшафта IVpmСЛТ. Отложения IV прибрежно-морской равнины начали накапливаться во время казанцевского межледниковья в условиях постепенно понижающегося уровня полярного бассейна. Особенности формирования казанцевских отложений обусловлены тектоническим планом района. Так, в северной и восточной частях района IV прибрежно-морской равнины откладывались наиболее грубые осадки, что связано с наличием здесь положительной структуры — Еняхинского поднятия. В центральной части равнины морской бассейн имел наибольшую глубину и здесь формировались глинистые осадки. После регрессии моря осадконакопление в пределах прибрежно-морской равнины в основном завершилось, сформировав литогенную основу ландшафта. В эпоху зырянского оледенения казанцевские отложения эпигенетически промерзли, что предопределило их криогенное строение и своеобразие инженерно-геологических свойств. Сформировавшаяся при этом многолетнемерзлая толща пород сохранилась без существенных изменений до настоящего времени. Наблюдаемый сейчас рельеф возник в конце верхнего плейстоцена. Казанцевская прибрежно-морская равнина является наиболее приподнятой поверхностью в пределах рассматриваемого участка северной лесотундры. Центральная часть равнины плоская, слабодренированная и в связи с этим сильно

заболоченная и заозеренная. Возвышенное положение определяет температурный режим пород, процессы сезонного промерзания-протаивания и пространственное распределение проявлений криогенных процессов. Незащищенный от сильных ветров снег сдувается на более низкие уровни, малая мощность снежного покрова не может препятствовать глубокому промерзанию верхней части толщи горных пород. Низкая температура ММП в свою очередь создает условия, неблагоприятные для произрастания древесной растительности. Поэтому в центральной части ландшафта древесный покров практически отсутствует. В связи с этим определяющим индикатором внутренних компонентов ПТК в пределах рассматриваемого ландшафта следует считать рельеф поверхности. По-видимому, наиболее тесные связи должны наблюдаться между параметрами рельефа и мерзлотной обстановки. Взаимосвязи рельефа с вещественным составом отложений будут выражены более слабо, поскольку накопление прибрежно-морских отложений определялось в основном древним рельефом, погребенным впоследствии.

Анализ условий формирования и функционирования остальных ландшафтов рассматриваемого района показал, что наиболее тесные связи следует ожидать между параметрами растительности и мерзлотных условий. Рельеф и гидрографическая сеть также оказывают влияние на мерзлотные условия. Рельеф и проявления ЭГП могут явиться индикаторами вещественного состава пород.

Для удобства изложения результатов парного корреляционного анализа целесообразно ввести ряд определений. Условимся называть связи эффективными (неэффективными) в зависимости от того, могут или не могут они быть использованы для индикации (на основе парных связей или на основе комплексных индикаторов, представленных уравнениями множественной регрессии). Эффективной считается связь, удовлетворяющая условию $r \geqslant 0{,}3$ (A), где r — парный коэффициент корреляции. Вполне эффективной будем считать связь, удовлетворяющую условию A на всех ландшафтах природной зоны. Если в пределах отдельных ландшафтов условие A не удовлетворяется, то связь будет ограниченно эффективной. Следует различать устойчивые и неустойчивые связи. Если связь между некоторыми компонентами ПТК на всех ландшафтах в пределах природной зоны единая по направленности (прямая или обратная), то она устойчива, в противном случае — неустойчива. С точки зрения ландшафтной индикации наибольший интерес представляют вполне эффективные устойчивые связи между внешними и внутренними компонентами ПТК. Неустойчивые ограниченно эффективные связи снижают доверие к ландшафтному индикатору. Область его применения сужается до территорий изученных ландшафтов, на которых связь эффективна.

В табл. 1 приведены парные коэффициенты корреляции между показателями компонентов ПТК. Парные коэффициенты корреляции между влажностью пород, мощностью торфа и коэффициентом дисперсности пород в различных интервалах глубин, с одной стороны, и показателями ландшафтных индикаторов — с другой, невысоки. Они не показаны здесь, поскольку связи между показателями не эффективны; не включены также парные коэффициенты корреляции характеристики экспозиции склонов с другими показателями, так как в рассматриваемом районе она не является ландшафтным индикатором ввиду слабой расчлененности рельефа.

Вполне эффективные устойчивые связи наблюдаются между температурой ММП и параметрами, характеризующими древесный покров. Условия произрастания и жизнедеятельности деревьев улучшаются с повышением температуры ММП. В свою очередь древесный покров является внешним условием процесса теплообмена между литосферой и атмосферой. Он благоприятствует, в частности, формированию более

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции между показателями компонентов ПТК

Компонент	Индекс компонентов ПТК	Показатель $t°$					Показатель $h_{стс}$				
		СЛТ		ЮЛТ		оценка связи	СЛТ		ЮЛТ		оценка связи
		III 1а	IV pm	III 1а	IV 1а		III 1а	IV pm	III 1а	IV 1а	
Растительности	СК	0,40	—	0,43	0,45	в. э.	0,61	—	0,78	0,63	в. э.
	ППК	0,10	0,10	0,21	0,00	н. э.	—0,12	—0,24	—0,27	—0,27	н. э.
	ППМ	—0,26	—0,08	—0,25	—0,05	»	—0,43	—0,37	—0,30	—0,41	в. э.
	$H_д$	0,35	—	0,38	0,41	в. э.	0,50	—	0,82	0,44	»
	$H_к$	0,12	0,14	0,30	0,28	о. э.	—0,14	0,00	0,23	—0,05	н. э.
Рельефа	K_s	0,30	—0,13	—0,12	—0,28	»	—0,20	—0,23	—0,31	—0,45	о. э.
	K_h	0,43	—0,13	0,18	0,11	»	0,00	—0,11	—0,08	—0,18	н. э.
	M_s	0,30	0,00	0,23	0,14	»	0,55	0,37	0,22	0,42	о. э.
	α	0,27	0,23	0,22	0,16	н. э.	0,10	0,42	0,22	0,20	»
	ΔH	—0,29	0,14	—0,26	0,00	»	—0,38	0,41	0,26	0,38	»
	$H_{абс}$	0,28	—0,22	—0,07	—0,08	»	0,57	—0,38	0,00	0,00	»
Инженерно-геологических условий	$W_{стс}$	—0,39	—0,57	—0,52	—0,46	в. э.	—0,42	—0,56	—0,53	—0,58	в. э.
	$W_в$	—0,07	—0,30	—0,30	—0,19	о. э.	—0,20	—0,32	—0,18	—0,27	о. э.
	$H_т$	—0,46	—0,50	—0,49	—0,41	в. э.	—0,23	—0,31	—0,38	—0,38	»
	$C_{d_{0-2}}$	0,39	0,21	0,32	—0,10	о. э.	0,00	0,00	0,00	—0,15	н. э.
	$C_{d_{2-4}}$	0,17	—0,09	—0,31	—0,30	»	—0,17	—0,22	—0,10	—0,23	»
	$h_{стс}$	0,44	0,41	0,44	0,34	в. э.	1,00	1,00	1,00	1,00	—
	T	—0,25	—0,38	0,04	0,25	о. э.	—0,49	—0,40	—0,32	—0,13	о. э.

Примечание. Ошибки коэффициентов корреляции не превышают 0,10; оценка связи: в. э. — вполне эффективная, о. э. — ограниченно эффективная, н. э. — неэффективная, T — время от замера параметров до 15.IX.

мощного снежного покрова, являющегося теплоизолятором, чем на незалесенных участках и сохранению более высокой температуры пород в зимнее время. Взаимосвязь между температурой ММП и характеристиками кустарничкового покрова намного слабее, чем у древесного покрова; связи неэффективные. Связь температуры ММП с показателями рельефа, как правило, неэффективная.

Вполне эффективные устойчивые связи глубины сезонного протаивания с показателями внешних компонентов ПТК отмечаются только для показателей древесного покрова, ограниченно эффективные — для мохово-лишайникового покрова. Глубина сезонного протаивания прямо связана с древесной растительностью на всех изучаемых ландшафтах, кроме IVpmСЛТ, где деревья не произрастают. Наличие леса и увеличение его густоты во всей лесотундровой зоне указывает на более мягкие геокриологические условия (в том числе увеличение глубины сезонного протаивания) по сравнению с незалесенными участками. Обратная слабая связь устанавливается между глубиной сезонного протаивания и мохово-лишайниковым покровом. Покров мха препятствует прогреванию верхней части толщи горных пород в летнее время. Слабая связь обусловлена тем, что главное влияние на глубину сезонного протаивания оказывает древесный ярус, затушевывающий влияние другой растительности. Ограниченно эффективные неустойчивые связи устанавливаются между глубиной сезонного протаивания и показателями рельефа. Ограниченно эффективной устойчивой следует считать связь глубины сезонного протаивания с кочковатостью. Глубина деятельного слоя под кочками всегда оказывается меньше, чем в межкочьях и на соседних ровных участках. Ограниченно эффективной и устойчивой является связь глубины сезонного протаивания с пятнами-медальонами. Прямая связь объясняется

увеличением интенсивности процесса теплообмена приповерхностной части литосферы с атмосферой при снятии или отсутствии растительного покрова [10]. Глубина сезонного протаивания прямо и очень слабо связана с крутизной поверхности, связь ограниченно эффективная. На склонах мощность сезонно-талого слоя оказывается несколько большей, чем на ровных участках. Слабая связь объясняется незначительной крутизной поверхности на севере Западной Сибири и ее малой расчлененностью. Лишь в пределах ландшафта IVpmСЛТ, несколько более расчлененного и лишенного древесного покрова, влияние рельефа на глубину сезонного протаивания увеличивается.

Анализ значений парных коэффициентов корреляции позволил сделать следующие выводы.

1. Ни один из рассмотренных показателей внешних компонентов ПТК не может быть использован в качестве индикатора компонентов инженерно-геологических условий.

2. В изученной ландшафтной зоне вещественный состав горных пород практически не связан с внешними компонентами ПТК.

3. Особую роль в индикации геокриологических условий в пределах лесотундровой зоны играет древесная растительность. Она тесно связана с температурой и глубиной сезонного протаивания ММП.

4. Индикационное значение параметров мезо- и микрорельефа более отчетливо проявляется на ландшафте IVpmСЛТ, где практически отсутствует древесная растительность. На других рассмотренных авторами ландшафтах лесотундровой зоны эта связь вуалируется влиянием показателей древесной растительности.

5. Для индикации компонентов инженерно-геологических условий следует попытаться использовать комплексные ландшафтные индикаторы, сконструированные на основе результатов множественного регрессионного анализа.

Комплексные количественные ландшафтные индикаторы; пространственная структура взаимосвязи

В результате реализации общепринятого алгоритма множественного регрессионного анализа [6] нами были получены уравнения для расчета мощности сезонно-талого слоя $h_{\text{стс}}$ и температуры пород t° (табл. 2). В каждое уравнение входит время T с очень небольшой долей вклада в множественную регрессию ($g<0{,}05$). Но необходимость его учета обуславливается существенным изменением влажности пород и глубины сезонно-талого слоя в период полевого сезона.

В пределах ландшафтов III и IV озерно-аллювиальных равнин южной лесотундры наибольший вклад в регрессию $h_{\text{стс}}$ вносит показатель сомкнутости крон деревьев ($g=0{,}83$—$0{,}58$). В ландшафтах III озерно-аллювиальной и IV прибрежно-морской равнин северной лесотундры наряду с показателями растительности наблюдается влияние на оценку $h_{\text{стс}}$ показателей мезорельефа ($g=0{,}20$—$0{,}30$). В пределах ландшафта IIIIaСЛТ древесная растительность развита слабо, а IVpmСЛТ — отсутствует. Поэтому именно мезорельеф становится существенным фактором, определяющим глубину сезонного протаивания.

При оценке температуры пород максимальный вклад в регрессию вносят показатели древесной растительности. В комплексный количественный индикатор температуры пород кроме показателей внешних входят показатели внутренних компонентов ПТК — мощность торфа, влажность пород и глубина сезонного протаивания, коэффициент дисперсности отложений до глубины 4 м. Их можно определять по данным зондировочного бурения. Используя эту информацию в комплексном количественном индикаторе, можно прогнозировать температуру пород на глубине 10—12 м — в зоне годовых нулевых амплитуд. Стандартная ошибка

Таблица 2

Комплексные количественные индикаторы температуры пород $t°$, град, и мощности сезонно-талого слоя $h_{стс}$, м

Подзона	Ландшафт	Уравнения множественной регрессии	Стандартная ошибка прогноза ΔY	Множественный коэффициент корреляции R	Доля вклада в регрессию *, g_i
СЛТ	III la	$t° = -3{,}5+6{,}9СК+2{,}4K_h-0{,}02T-$ $-0{,}7W_{стс}-0{,}3H_т+0{,}18C_{d_0-2}$	1,1°	0,74	1—0,26; 2—0,29; 3—0,12; 4—0,07; 5—0,10; 6—0,16;*
		$h_{стс} = -0{,}18+2{,}94СК+0{,}05H_{абс}-$ $-0{,}03\Delta H+1{,}01M_s-0{,}013T$	0,44 м	0,86	1—0,24; 2—0,30; 3—0,05; 4—0,07; 5—0,25;
	IIV pm	$t° = -0{,}5-0{,}03H_{абс}-0{,}006T-$ $-1{,}3W_{стс}-0{,}4H_т-0{,}04C_{d_0-2}-0{,}8W_в$	0,8°	0,71	1—0,07; 2—0,11; 3—0,35; 4—0,33; 5—0,05; 6—0,09;
		$h_{стс} = 3{,}38-1{,}74ППМ+0{,}02\Delta H-$ $-0{,}02H_{абс}+0{,}09\alpha-0{,}006T$	0,33 м	0,73	1—0,26; 2—0,14; 3—0,20; 4—0,17; 5—0,24;
ЮЛТ	III la	$t° = -2{,}0+4{,}2СК+2{,}3H_к+0{,}004T-$ $-0{,}1h_{стс}-0{,}7W_{стс}-0{,}03H_т+$ $+0{,}18C_{d_0-2}-0{,}24C_{d_2-4}$	1,1°	0,76	1—0,27; 2—0,14; 3—0,004; 4—0,05; 5—0,11; 6—0,16; 7—0,13; 8—0,14;
		$h_{стс} = 1{,}53+4{,}82СК-1{,}23ППМ+$ $+0{,}04\Delta H-0{,}004T$	0,55 м	0,82	1—0,83; 2—0,07; 3—0,06; 4—0,04;
	IV la	$t° = -2{,}4+3{,}3СК+2{,}6H_к+0{,}01T-$ $-0{,}09W_{стс}-0{,}3H_т-0{,}10C_{d_2-4}$	1,0°	0,68	1—0,28; 2—0,15; 3—0,16; 4—0,17; 5—0,15; 6—0,09;
		$h_{стс} = 1{,}50+3{,}4СК-0{,}6ППК-$ $-0{,}7ППМ+0{,}028\Delta H-0{,}4K_s-0{,}004T$	0,53 м	0,73	1—0,58; 2—0,07; 3—0,09; 4—0,12; 5—0,10; 6—0,04;

* Номер соответствует месту члена в уравнении (не считая свободного).

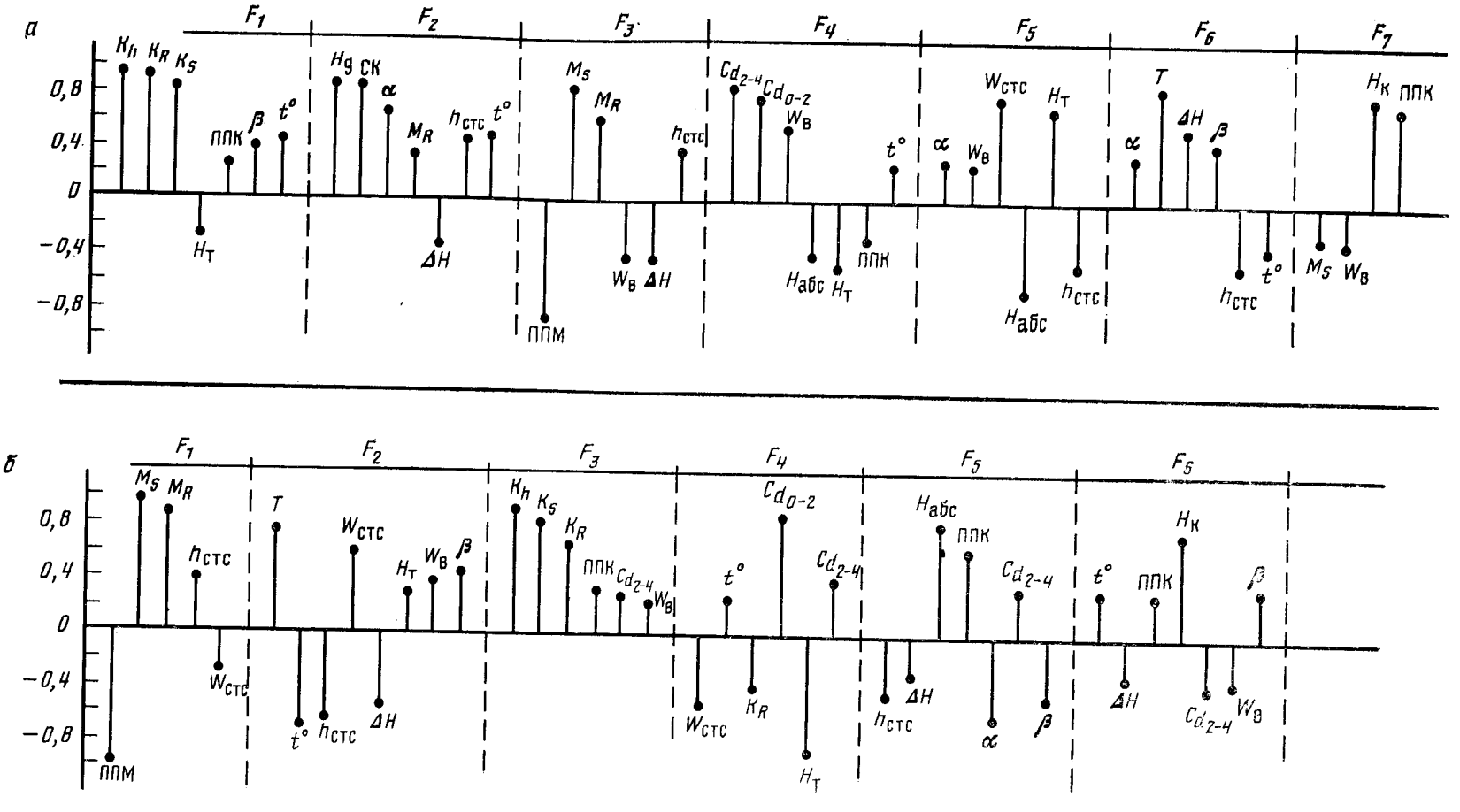
Таблица 3

Оценка качества комплексных количественных индикаторов

Подзона	Ландшафт	Параметр	$R_т$	$R_э$	$\Delta R=R_т-R_э$
СЛТ	III la	$t°$	0,81	0,74	0,07
		$h_{стс}$	0,90	0,86	0,04
	IV pm	$t°$	0,77	0,71	0,06
		$h_{стс}$	0,81	0,73	0,08
ЮЛТ	III la	$t°$	0,85	0,76	0,09
		$h_{стс}$	0,93	0,82	0,11
	IV la	$t°$	0,77	0,68	0,09
		$h_{стс}$	0,81	0,73	0,08

Примечание: $R_т$ — коэффициенты множественной корреляции, получаемые при использовании всех рассматриваемых параметров; $R_э$ — экспериментально полученные коэффициенты множественной корреляции.

прогноза температуры пород варьирует от 0,8 до 1,1°, а глубины сезонного протаивания — от 0,33 до 0,55 м при изменении температуры пород от —6 до +1° С, а глубины сезонного протаивания — от 0,05 до 3 м. Однако стандартные ошибки не полностью отражают точность определения рассматриваемых индикаторов, поскольку даже очень редкие ураганные значения показателей могут существенно повысить стандартную


а
F1
F2
F3
F4
F5
F6
F7
0,8
0,4
0
−0,4
−0,8
Kh KR KS
ППК β t°
HT
Hg СК α
MR
hстс t°
ΔH
MS MR
hстс
ППМ
WB ΔH
Cd2-4 Cd0-2
WB
t°
Hабс HT
ППК
α WB
Wстс HT
Hабс
hстс
α T ΔH β
hстс t°
MS WB
HK ППК
б
F1
F2
F3
F4
F5
F6
0,8
0,4
0
−0,4
−0,8
MS MR
hстс
Wстс
ППМ
T
Wстс
HT WB β
t° hстс
ΔH
Kh KS KR
ППК Cd2-4 WB
t°
Cd0-2
Cd2-4
Wстс KR
HT
Hабс
ППК
Cd2-4
hстс ΔH
α β
t° ППК HK β
ΔH
Cd2-4 WB

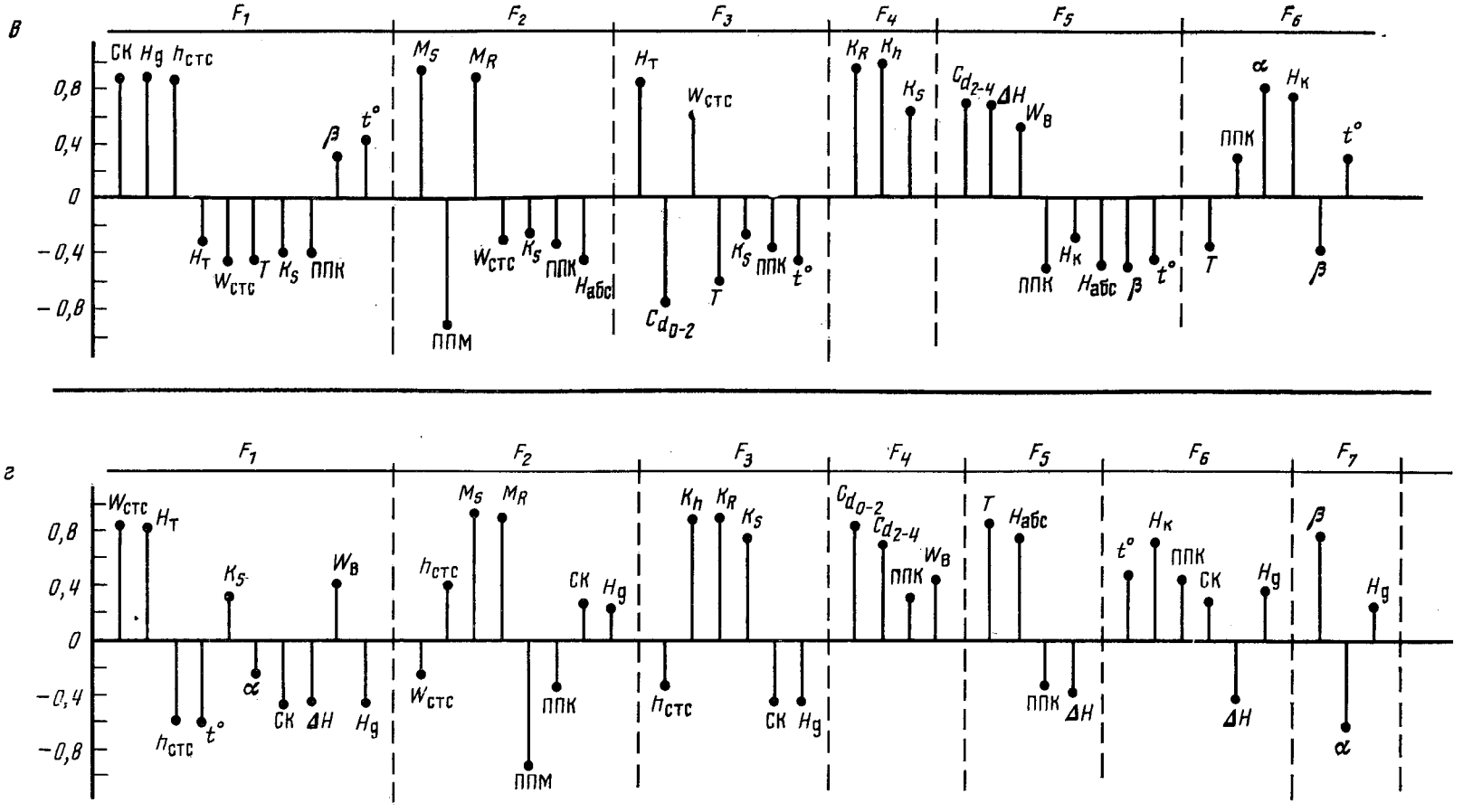


Рис. 3. Факторные нагрузки для *а* — ландшафта III 1а СЛТ, *б* — ландшафта IV рm СЛТ, *в* — ландшафта III 1а ЮЛТ, *г* — ландшафта IV 1а ЮЛТ

ошибку прогноза. В целом точность индикации соответствует требованиям, предъявляемым к инженерно-геологическим картам среднего масштаба. Качество множественных регрессионных моделей оценено путем сравнения величин коэффициентов множественной корреляции ($R_т$), полученных при использовании всех рассматриваемых показателей с экспериментальными ($R_э$) (табл. 3).

Введение в уравнения множественной регрессии дополнительных показателей не приводит к существенному увеличению коэффициентов корреляции, а следовательно, и точности уравнений. Разность между максимально возможными значениями коэффициентов множественной корреляции и полученными авторами, как правило, не превышает 0,1. Это говорит о правильном выборе независимых переменных для оценки температуры и глубины сезонного протаивания ММП.

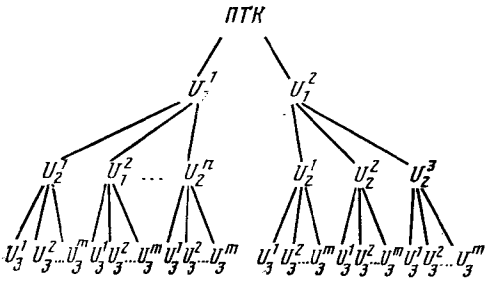


Рис. 4. Дерево классификации ПТК

С целью получения комплексной характеристики, учитывающей разные показатели внешних компонентов ПТК и предназначенной для индикации сразу нескольких внутренних его компонентов, целесообразно использовать факторный анализ [5, 7].

Нагрузки на факторные оси для разных ландшафтов показаны на рис. 3. Первые факторы, поглощающие наибольшую часть дисперсии, являются наиболее информативными. Рассмотрение факторных нагрузок в целом позволяет сделать вывод о том, что каждому из изучаемых ландшафтов присуща своя группа показателей компонентов ПТК, вносящих наибольший вклад в общую дисперсию. Для ландшафта IIIaСЛТ наиболее значимым оказался фактор кочковатости, для IVpmСЛТ — наличие пятен-медальонов, для IIIaЮЛТ — древесная растительность, для IVlaЮЛТ — мерзлотные характеристики.

Среди ландшафтов, принадлежащих к одной подзоне, можно отметить некоторые общие закономерности. В ЮЛТ наибольшие нагрузки на первый фактор общности дают показатели древесной растительности, а в СЛТ они уступают место показателям микрорельефа. Таким образом, факторный анализ дает возможность оценить структуру взаимосвязи внешних и внутренних компонентов ПТК, а также наметить пути разработки корректной классификации ПТК для целей инженерно-геологического картирования.

Для индикации инженерно-геологических условий в пределах лесотундровой зоны, вероятно, наиболее важным признаком является наличие (u_1^1) или отсутствие (u_1^2) древесной растительности. Этот признак должен быть основанием классификации на первом уровне расчленения множества ПТК (u_1). Для ПТК с древесной растительностью наиболее информативным по отношению к оценке мерзлотных условий является сомкнутость крон деревьев (признак-основание второго уровня расчленения (u_2)). На уровне квазиоднородных по показателю сомкнутости крон подмножеств ПТК признаком-основанием дальнейшего членения следует считать характеристики микрорельефа (u_3). Безлесные ПТК (u_1^2) можно разделить на ПТК с болотной растительностью (u_2^1), торфянники (u_2^2) и с тундровой растительностью (u_2^3). Подмножество ПТК третьего уровня расчленения выделяют по показателям микрорельефа (u_3) (рис. 4).

Исследование пространственной структуры взаимосвязи компонентов ПТК предполагает совместный анализ моделей полей их показателей. Один из способов анализа заключается в сравнении коэффициентов по-

Таблица 4

Парные коэффициенты корреляции между коэффициентами полиномов-моделей полей показателей внешних и внутренних компонентов ПТК

Показатели внешних компонентов ПТК	Показатели внутренних компонентов ПТК					
	h (стс)		$H_т$		$C_{d_{0-10}}$	
	СЛТ	ЮЛТ	СЛТ	ЮЛТ	СЛТ	ЮЛТ
	Подзоны					
СК	0,99	0,97	—0,97	—0,87	—0,84	—0,11
ППК	0,99	—0,99	—0,98	0,94	—0,78	0,40
$H_к$	0,99	—0,89	—0,96	0,72	—0,87	—0,07
K_h	0,99	—0,97	—0,97	0,85	—0,85	0,10
M_s	—0,98	0,99	0,98	—0,93	0,76	—0,24
ΔH	—0,86	0,98	0,80	—0,95	0,93	—0,45
P	0,88	0,99	—0,90	—0,94	—0,54	—0,43
$\mathrm{tg}\,\alpha$	—0,99	0,92	0,97	—0,77	0,86	0,05
З	—0,98	—0,96	0,94	0,96	0,84	0,51
Д	—0,98	0,94	0,98	—0,93	0,74	—0,38
П	—0,49	0,96	0,40	—0,83	0,66	—0,13
Тр	0,95	—0,97	—0,96	0,86	—0,68	0,09
Б	0,78	—0,94	—0,85	0,96	—0,35	0,55

Примечание. Ошибки коэффициентов корреляции не превышают 0,10; P — энтропия абсолютных отметок; З — заозеренность; Д — густота речной сети; П — пораженность многолетним пучением; Тр — пораженность термокарстом; Б — заболоченность.

линомов одной степени, полученных на единой координатной основе. В качестве количественной меры сходства используется парный коэффициент корреляции. При этом учитывается регионально-коррелированная составляющая полей показателей сравниваемых компонентов. Оценка сходства полей с учетом как регионально-коррелированной, так и периодической составляющих требует построения карты сходства. Предварительно все показатели компонентов ПТК следует преобразовать в безразмерные. Для количественной оценки сходства структур моделей полей показателей сравниваемых компонентов их значения в экспериментальных точках перемножают. Композиция произведений составляет экспериментальную основу ее модели (карты произведений). По карте возможно выявить структуру пространственной взаимосвязи компонентов ПТК с учетом регионально-коррелированной и периодической составляющих. Произведения стандартизованных показателей ПТК могут рассматриваться как обыкновенные коэффициенты корреляции. Если трендповерхности сравниваемых показателей компонентов ПТК в одних и тех же точках отклоняются от среднего значения в одном направлении, их произведения будут положительными и наоборот [5].

Результаты сравнения моделей полей показателей компонентов ПТК, при котором учитывается регионально-коррелированная составляющая изменчивости, приведены в табл. 4. Тесный характер связей (коэффициенты корреляции, как правило, превышают 0,75) указывает на близость структур сравниваемых полей. Это обстоятельство предопределено единством пространственной структуры процесса развития и функционирования ПТК как природной системы. Сравнение моделей полей показателей компонентов ПТК с учетом регионально-коррелированной и периодической составляющих выявило, как и следовало ожидать, существенное снижение тесноты взаимосвязи между компонентами. Совмещение этих составляющих приводит к усложнению структуры полей показателей сравниваемых компонентов — возникают флуктуации разных порядков, снижающие тесноту связей. Формирование флуктуаций связано с конкретными условиями процесса функционирования компонентов ПТК.

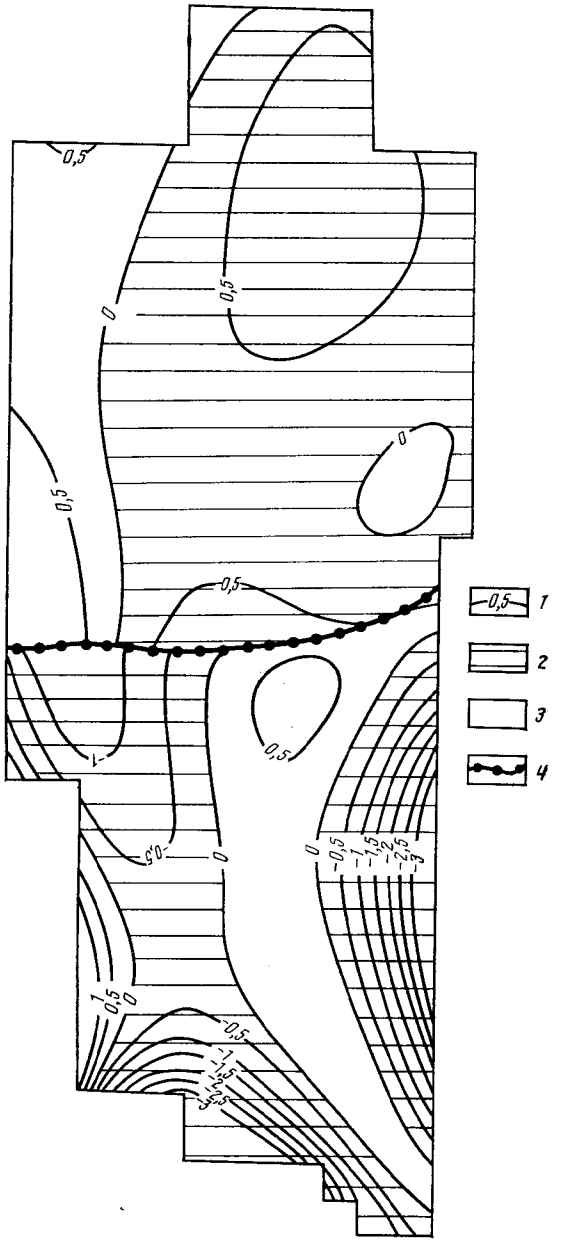


Рис. 5. Модель поля произведения глубины сезонного протаивания и высоты кочек ($h_{стс} \times K_h$): *1* — изолинии значений произведения; *2* — область обратных связей; *3* — область прямых связей; *4* — граница между северной и южной лесотундровыми подзонами

В качестве примера оценки пространственной структуры взаимосвязи с помощью карты произведений на рис. 5 приведена модель поля произведений $h_{стс} \times K_h$. Анализ структуры модели выявил наличие обратной зависимости между рассматриваемыми показателями на большей части территории, что не противоречит содержательной модели связи. На некоторых участках значение произведения близко к нулю. Это — области неопределенности и для геологической интерпретации связей в них необходимо привлекать содержательный анализ. Карта позволяет выявить пространственную взаимосвязь компонентов ПТК и, следовательно, при-

ближенно оценить структуру поля показателя некоторого внутреннего компонента ПТК. Взаимосвязь внешних и внутренних компонентов ПТК позволяет по полю внешнего компонента оценить пространственную изменчивость внутреннего и предварительно наметить размещение и объемы съемочных работ: а) места расположения ключевых участков, буровых скважин, расстояние между ними и т. д.; б) получить характеристики пространственной изменчивости компонентов ПТК и подтвердить (опровергнуть) геологические гипотезы; в) построить математические модели полей геологических параметров. Однако для прямой индикации в пределах лесотундровой зоны карты не пригодны, так как связи между показателями компонентов ПТК не достаточно тесны.

Выводы

1. Обязательным условием использования ландшафтно-индикационного метода при региональных геологических и инженерно-геологических исследованиях следует считать предварительное выявление структуры и силы взаимосвязи компонентов ПТК. Выполнение этого условия обеспечивает корректность процедуры экстраполяции данных, полученных на ключевых участках.

2. Для выявления структуры взаимосвязи компонентов ПТК необходимо: количественно оценить точность и достоверность использования частных ландшафтных индикаторов; с этой целью используется парный корреляционный анализ; сконструировать комплексные количественные индикаторы некоторых компонентов инженерно-геологических условий, оценить вероятность и ошибку индикации; с этой целью используется множественный корреляционный и последовательный регрессионный анализы.

3. Представление о пространственной структуре взаимосвязи компонентов ПТК формируется в процессе сравнения карт полей параметров компонентов ПТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэроландшафтно-индикационные методы при региональных инженерно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1981. 203 с.
2. *Бондарик Г. К., Комаров И. С., Ферронский В. И.* Полевые методы инженерно-геологических исследований. М.: Недра. 1967. 372 с.
3. *Видина А. А.* О диагностических принципах ландшафта и его морфологических частей.//Ландшафтный сборник. М.: Изд-во МГУ, 1970. С. 160—181.
4. Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. 200 с.
5. *Девис Дж.* Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 574 с.
6. *Комаров И. С., Хайме Н. М., Бабенышев А. П.* Многомерный статистический анализ в инженерной геологии. М. Недра, 1976. 199 с.
7. *Крамбейн У., Кауфмен М., Мак-Кеммон Р.* Модели геологических процессов. М.: Мир, 1973. С. 76—95.
8. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. 165 с.
9. Методическое руководство по инженерно-геологической съемке масштаба 1 : 200 000. М.: Недра, 1978. 391 с.
10. *Павлов А. В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.
11. *Пендин В. В., Кюнтцель В. В.* Количественные характеристики литологического строения территории.//Гидрогеология и инженерная геология. Новочеркасск, 1978. С. 58—63.
12. *Солнцев Н. А.* К теории природных комплексов//Вестн. МГУ. Сер. геогр., 1968, № 3. С. 14—27.

Московский геологоразведочный институт

Поступила в редакцию 7.II.1986

УДК 624.131.1 : 551.49 : 626.87

ГАВИЧ И. К.

ОСОБЕННОСТИ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

Современный мелиоративный объект представляет собой сложный и разнообразный комплекс взаимосвязанных техногенных и природных систем. Первые представляют различные гидротехнические, дренажные и другие инженерные сооружения, а также агротехнические и водохозяйственные мелиорации и мероприятия, которые образуют группу технико-экономических систем разного ранга, целенаправленно воздействующих на орошаемую (осушаемую) территорию и прилегающие земли. Мелиорируемые земли, почвы, тропосфера, растительные и животные сообщества, верхняя часть геологического разреза земной коры с содержащимися в ней подземными водами в зонах аэрации и насыщения образуют группу природных систем, находящихся в сложном взаимодействии. Обе группы по целевому назначению объединяются человеком как деятельностной личностью, и создается сложная природно-техногенно-социальная система, экологические воздействия которой на окружающую среду не менее значительны, чем собственно мелиоративные.

Системный подход позволяет подчеркнуть важные для изучения и освоения мелиорируемой территории принципиальные положения.

1. Мелиоративный объект является многоуровенной и многофакторной системой, и как такая система он обладает свойством дуализма. Это выражается в том, что по своему целевому социологическому содержанию и воздействию на окружающую среду он должен рассматриваться как подсистема более крупной экологической системы, а с позиций практического назначения как самостоятельная сложно построенная мелиоративная система, в которой каждая из подсистем также обладает свойством дуализма.

2. Формируются многочисленные разноуровенные, различные по значимости и характеру проявления природные, технические, экономические, социальные связи и взаимодействия. В соответствии с изученностью этих систем и принятой степенью риска принимается решение о том, какими связями и взаимодействиями можно пренебречь, на каком временно́м этапе, с какими преимуществами и потерями.

3. На основе количественного анализа определяется структура и механизм функционирования мелиоративной системы, на базе которых далее выполняется проектирование, строительство, а в последующем осуществляется контроль за эксплуатацией системы и оптимальное управление ее режимом работы и природной обстановкой мелиоративного объекта.

4. Результаты изысканий и проектирования должны дать не только научное обоснование к последующему хозяйственно-социологическому освоению мелиоративного объекта, но и четко определить, с помощью каких параметров системы следует осуществлять рациональное управление объектом, режимом подземных вод, почвенными и другими процессами.

Таким образом, мелиоративный объект является сложной системой с важными экологическими функциями, изучение, проектирование, стро-

ительство и эксплуатация которой в настоящее время возможны только на основе системного подхода, который должен стать основной методологической базой всех исследований на объекте. Главные принципы системного подхода — целостность, взаимосвязь и взаимообусловленность явлений и процессов, многоуровенность взаимодействий — требуют существенных изменений в существующем подходе к планированию и проведению изысканий, обработке полученной информации, построению математических моделей мелиорируемых объектов, составлению различных прогнозов, постановке наблюдений за режимом подземных вод и функционированием объекта в целом [1—3, 6, 11].

Рассмотрим некоторые наиболее важные из этих изменений. Так, освоение мелиоративного объекта следует рассматривать как единый, непрерывный, взаимосвязанный процесс, состоящий из пяти этапов: изыскания ⇄ проектирование ⇄ строительство ⇄ эксплуатация ⇄ управление. Отсюда следует, что гидрогеологи, так же как и инженер-геологи, почвоведы, гидрологи, экономисты и другие специалисты, должны совместно работать на всех стадиях освоения объекта, в том числе и на стадии эксплуатации, а в гидрогеологических и инженерно-геологических изысканиях должна быть стадия эксплуатационной разведки, как это с 1978 г. принято в Мингео СССР применительно к геологоразведочному процессу изысканий на подземные воды [2, 5]. Целью этой стадии должно быть изучение и обобощение опыта эксплуатации мелиоративной системы, установление на основе анализа многолетних режимно-балансовых наблюдений оправдываемости составленных ранее гидрогеологических, инженерно-геологических, почвенных, экологических и других прогнозов, разработка оптимального варианта дальнейшей эксплуатации оросительной системы, а также АСУ-системы, которая поддерживала бы текущие гидрогеологические, инженерно-геологические и другие условия и эксплуатацию объекта в оптимальном режиме. Задача эта чрезвычайно сложная и не может быть выполнена без хорошего научно обоснованного в первую очередь гидрогеологического и инженерно-геологического анализа формирующейся природной обстановки и прогноза ее дальнейших изменений, так как именно результаты этого анализа являются базой для решения собственно мелиоративных задач. Как показывает наш опыт решения оптимизационных задач, оптимизационные модели и обработка для них исходной информации во многом отличаются от того, что принято делать на стадии детальной разведки [6, 7]. Для мелиоративных объектов с названными задачами пока в гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях нет стадии эксплуатационной разведки, выполняется контроль за изменением режима подземных вод по системе наблюдательной сети, но она слабо ориентирована на решение оптимизационных управленческих задач [2, 11].

Составляемые в настоящее время гидрогеологические прогнозы для мелиоративного объекта выполняются в детерминированной постановке, в то время как один из главных факторов прогноза — величина инфильтрационного питания от орошения — является вероятностной величиной. Более того, речной и дренажный сток, расходы оросительных каналов, естественный режим подземных вод тоже являются вероятностными факторами и оказывают существенное стохастическое влияние на уровенный режим подземных вод. Это говорит о том, что детерминированный подход не обеспечивает достоверного решения задачи. Заметим, что используемые в настоящее время модели учитывают только водные мелиорации, а другие ее виды (внесение удобрений, снегозадержание и т. п.) не учитываются, а это важно принимать во внимание при составлении водно-солевых прогнозов, при оценке изменения инженерно-геологических и гидрогеологических свойств горных пород под влиянием мелиорации и в других случаях.

Как показывает наш опыт, вероятностный характер гидрогеолого-мелиоративных прогнозов возможно учесть построением вероятностно-детерминированной модели с использованием принципов теории планирования эксперимента. Для этого на численной модели объекта по выбранному оптимальному плану проводят вычислительный эксперимент в виде факторно-диапазонного анализа с применением имитационного моделирования. По результатам этого эксперимента выполняют ранжирование факторов, влияющих на изучаемый процесс, и получают систему нормированных регрессионных уравнений, описывающих объект и изучаемый процесс. Коэффициентами этих уравнений являются ранжированные факторы, а функцией отклика — искомая прогнозная величина, например изменение уровня грунтовых вод. Задавая вероятностное изменение факторам, получают вероятностное распределение искомой функции в заданном числе расчетных точек. Весь процесс решения задачи осуществляется на ЭВМ.

Многолетний опыт работы проблемной комиссии по математическим методам и результаты проведенных за последние годы семинаров по математическому моделированию гидрогеологических и инженерно-геологических процессов показывают, что имеются оригинальные разработки в области построения математических моделей орошаемых территорий, учитывающих в одной детерминированной модели зону аэрации и зону насыщения, а также комплекс гидрогеологических, почвенных и других взаимодействий [10], разработаны интересные пакеты программ для численного решения задач взаимодействия поверхностного и подземного стока (работы В. С. Зильберга и Г. М. Великиной, Г. П. Епихова и др. [4]). Для определения в вероятностной постановке зон подтопления в районе крупных равнинных водохранилищ (А. В. Баранов [9]), разработаны методы натурного подобия применительно к составлению гидрогеолого-мелиоративных прогнозов на орошаемых территориях (работы В. Г. Самойленко, Н. В. Роговской [8], И. К. Гавич, А. П. Белоусовой и др. [8]), получили дальнейшее развитие математические методы описания сложных гидродинамических и гидрогеохимических процессов (работы В. М. Шестакова, Н. Н. Веригина и др. [10]). Однако это все решения частных, хотя и важных задач, а требуется постановка комплексных крупных научно-исследовательских работ непосредственно для мелиоративных объектов, в которых одновременно принимали бы участие многие специалисты, в том числе экономисты, социологи и др. Пока таких комплексных научных программ практически нет.

Необходимо подчеркнуть еще один важный вывод, который является следствием системного подхода. Если мелиоративный объект — сложная система, включающая многие подсистемы (геологическую, гидрогеологическую, инженерно-геологическую и др.), то у него появляются, как у любой системы, свои новые свойства, которые не тождественны свойствам, входящих в объект подсистем. Вот эти новые свойства орошаемой территории как мелиоративной системы и надо изучать, ее новую структуру и комплексные развивавшиеся в ней взаимодействия, в первую очередь водно-солевые. Такие взаимодействия могут быть изучены путем анализа многолетних стационарных наблюдений за эксплуатацией крупных мелиоративных систем. Успешная попытка таких исследований выполнена большим коллективом туркменских специалистов под руководством Н. В. Роговской [8] на мелиоративной системе Каракумского канала. Для этой системы по данным многолетних стационарных наблюдений создан комплекс картографических моделей, позволивший выявить закономерности ее функционирования и обосновать мероприятия по оптимизации дальнейшей эксплуатации.

Системный подход требует, чтобы были выявлены границы, структура, свойства и основные взаимодействия и связи внутри каждой из подсистем и в системе в целом, а также ее связи и взаимодействия с дру-

гими системами того же ранга и более крупного. Только в этом случае можно достоверно оценить все положительные мелиоративные эффекты, которые дает система, и выявить негативные последствия и ущерб, возникающие в результате работы объекта и вследствие разрыва и неучета в его модели всех внутренних и внешних связей. Такая постановка позволяет оценить результаты всех прогнозов, в том числе гидрогеологических и инженерно-геологических, единым критерием через урожайность и надежно обосновать рациональное функционирование мелиоративной системы на очень долгий срок. Таким образом, из анализа мелиоративного объекта как системы следует, что оценка рациональности ее функционирования требует не только того, чтобы она обеспечивала получение максимальной урожайности (или максимума товарной продукции) с мелиорированных и сопредельных земель, но и сохраняла такую отдачу очень долгий срок, а с учетом реконструкций объекта — практически бесконечно. При этом естественно стремиться к тому, чтобы затраты на освоение и эксплуатацию объекта были минимальные, а ущерб природной среде находился в заданных ограничениях. Отсюда ясно, что оценка рациональности функционирования мелиоративного объекта является многоцелевой задачей и ее решение может быть получено только как результат целенаправленного сотрудничества специалистов разного профиля. Первоочередной задачей для гидрогеологов и инженер-геологов является доказательное выделение на принципах системного подхода их собственной задачи, которую можно назвать как оптимизация гидрогеологического и инженерно-геологического обоснования мелиоративного объекта, рассматривая ее как часть решения общей проблемы оптимального функционирования объекта.

Возможно наметить один из путей ее решения, связав качество функционирования объекта с качеством проектного решения, а последнее с качеством изысканий, и в свою очередь качество изысканий — с точностью комплексного гидрогеолого-мелиоративного прогноза, по результатам которого принимаются проектные решения и оценивается рациональность работы объекта. Из такой постановки следует, что качество работы объекта может быть оценено точностью совпадения фактической и проектной урожайности. Обобщенная дисперсия показателя проектной урожайности как качества проектного решения будет включать как один из многих факторов, влияющих на показатель урожайности, обобщенную дисперсию показателя комплексного гидрогеолого-мелиоративного прогноза. Эта дисперсия как показатель точности комплексного прогноза оценивается через среднеквадратические ошибки частных прогнозных функций, которые количественно характеризуют результаты частных прогнозов, например, таких, как подтопление территории, оценка эффективности работы дренажа, возможность засоленности земель и т. п.

Таким образом, среднеквадратические ошибки прогнозных функций оценивают качество изысканий применительно к каждому частному прогнозу, входящему в понятие комплексного гидрогеолого-мелиоративного прогноза, а качество изысканий в целом оценивается критерием в виде обобщенной дисперсии точности этого прогноза. В таком качестве критерий точности прогноза отвечает принципу обратной связи и способствует целенаправленности изысканий. Обобщенную дисперсию точности комплексного прогноза возможно связать с показателями стоимости проектных решений и объекта в целом, например через функцию риска. Это позволит дополнить критерий качества стоимостным (ресурсным) критерием и оценить те убытки или прибыль, которые возникают в проектных решениях в результате разной точности гидрогеолого-мелиоративного прогноза. При этом точность рассматривается как следствие разных планов построения и проведения изысканий, дающих каждый разное количество и качество информации, на основе которой составляется комплексный гидрогеолого-мелиоративный прогноз.

Системный подход требует существенных изменений в принятом построении математических моделей мелиорируемых территорий, а именно:

а) должно осуществляться последовательное постадийное составление и детализация комплекса разноуровенных моделей, адаптирующихся от стадии к стадии не только к накапливаемой по результатам изысканий информации, но и к проектным вариантам разработок структуры и эксплуатации мелиоративного объекта в целом и отдельных его элементов. При этом проектные варианты сами должны уточняться на основе результатов предварительных прогнозов, которые выполняются на этих моделях;

б) математическая модель мелиорируемой территории должна рассматриваться как сложная деятельностная мелиоративная система с важными экологическими функциями, быть вероятностно-детерминированной как и все составляющие ее подмодели и строиться как постоянно-действующая, охватывающая значительный по площади регион. Это обеспечивается выполнением требований пункта «а»;

в) математическая модель мелиорируемой территории должна быть управляема, так как мелиоративная система как инженерное сооружение в процессе ее эксплуатации реконструируется и совершенствуется. Кроме того, формирующаяся в зоне ее действия природная обстановка должна не только контролироваться, но и направленно изменяться так, чтобы обеспечивалось сохранение заданного ее состояния. Здесь обращает на себя внимание необходимость строить управляемую модель как адаптирующуюся, самоорганизующуюся на основе реализуемых обратных связей. При этом для всех подсистем и системы в целом должны быть выделены параметры управления и управляющие воздействия, т. е. факторы, способы и приемы, с помощью которых следует и можно осуществлять рациональное управление работой мелиоративного объекта.

Такая постановка приводит к необходимости решать ряд сложных проблем: 1) установить требуемый для этого объем информации, ее качество и формы представления в моделях; 2) разработать теорию и методику построения и использования комплексных разноуровенных управляемых постоянно-действующих моделей мелиорируемых территорий; 3) углубить представление о физических и физико-химических механизмах основных гидрогеологических, инженерно-геологических, почвенных и других процессах и явлениях, развивающихся или активизирующихся на мелиорируемых территориях, условиях их взаимодействия и проявления; 4) разработать математическое обеспечение для реализации управляемых комплексных моделей мелиоративных систем на современных вычислительных машинах.

Успешное решение этих задач требует не только координации научных исследований комиссией по математическим методам в инженерной геологии и гидрогеологии и активной совместной работы нескольких комиссий, что в меру имевшихся возможностей делается, но, главное, научная работа по названным проблемам должна выполняться головными и отраслевыми институтами Минводхоза СССР и РСФСР совместно с МИНГЕО СССР, институтами Академии наук СССР, вузами и университетами по комплексной общесоюзной тематике через ГКНТ.

Для успешной реализации программы мелиорации необходимо активизировать: а) разработку теории и методики построения управляемых, постоянно-действующих математических моделей мелиорируемых территорий и внедрение их в практику изыскательских и проектных работ гипроводхозов Минводхоза СССР и РСФСР; б) разработку алгоритмов и составление программ для ЭВМ, позволяющих исследовать на разных стадиях изысканий и проектирования поведение мелиоративных систем, выполнять гидрогеологические и инженерно-геологические прогнозы с учетом экологических аспектов; в) организацию специальных опытных полигонов на типовых оросительных и осушительных системах с целью

дальнейшего изучения физических и физико-химических механизмов основных гидрогеологических, инженерно-геологических, почвенных и других процессов, развивающихся и активизирующихся на орошаемых и осушаемых землях, и представления их в управляемых математических моделях; г) выявление механизма функционирования и взаимодействий мелиоративного объекта как комплексной эколого-мелиоративной системы; д) внедрение результатов научных исследований в практику путем участия и проведения специальных семинаров, совещаний и публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Балаев Л. Г., Кац Д. М.* Гидрогеологические и инженерно-геологические исследования в связи с мелиорацией земель.— В кн.: Гидрогеология. Секция С-16. Докл. 27-го Междунар. геол. конгресса. М.: Наука, 1985, с. 15—20.
2. *Гавич И. К., Мироненко В. А., Язвин Л. С.* Оптимизация гидрогеологических исследований в связи с задачами прогнозов.— В кн.: Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов. Т. 1. М.: Наука, 1982, с. 76—88.
3. *Гавич И. К.* Системный подход в гидрогеологических прогнозах на орошаемых территориях.— В кн.: Вопросы мелиоративной гидрогеол. и инженерной геологии и мелиоративного почвоведения. Сб. науч. тр. ВНИИГиМ. М., 1984., с. 195—206.
4. Математическое моделирование гидрогеологических процессов/Под ред. Васильева О. Ф. Новосибирск, 1984. 150 с.
5. Методическое руководство по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М.: ВСЕГИНГЕО, 1979, с. 65.
   Методы охраны подземных вод от загрязнения и истощения. М.: Недра, 1985. 320 с.
7. Методы системного анализа в мелиорации и водном хозяйстве. Л. Гидрометеоиздат, 1983, с. 121—134.
8. Моделирование гидрогеохимических процессов и научные основы гидрогеохимических прогнозов/Под ред. Лялько В. И. М.: Недра, 1985. 152 с.
9. Опыт и перспективы использования математического моделирования при геолого-гидрогеологическом обосновании народнохозяйственных мероприятий/Под ред. Нейсерова В. Д. Белгород, 1980. 164 с.
10. *Шестаков В. М., Пашковский И. С., Сойфер А. И.* Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М.: Недра, 1982. 244 с.
11. *Штепа Б. Г.* Задачи по совершенствованию методов оценки и прогноза мелиоративного состояния земель.— В кн.: Вопросы мелиоративной гидрогеологии и инженерной геологии и мелиоративного почвоведения. Тр. ВНИИГиМ. М., 1984, с. 6—13

Московский геологоразведочный институт

Поступила в редакцию
11.VII.1985

УДК 624.131.43

КОМИССАРОВА Н. Н., КОЛОМИЙЦЕВ Н. В.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД ВОДНОГО ГЕНЕЗИСА

За последние 15—20 лет научные достижения в области четвертичной геологии, палеогеографии, палеопедологии, криолитологии и инженерной геологии дают основание утверждать, что просадочность лёссовых пород плейстоценового возраста сформировалась под воздействием комплекса постседиментационных процессов в суровой перигляциальной климатической обстановке при решающей роли криолитогенеза. Криоэлювиальная гипотеза формирования лёссовых пород подробно рассмотрена в работах Е. М. Сергеева, А. В. Минервина, А. М. Воронина и др. [1, 3, 5, 10]. Просадочность формируется и в голоцене.

В настоящее время появились экспериментальные данные, полученные в результате модельных исследований в лабораторных условиях, позволяющие предположить, что формирование просадочности лёссовых пород может идти и другим путем.

В процессе увлажнения грунтов наряду с явлением просадки наблюдается набухание, снижающее эффект уплотнения. Характер проявления деформации зависит от интенсивности проявления этих двух противоположно направленных процессов. Широко известен факт, что в начальный момент увлажнения в компрессионном приборе образцов лёссового грунта, содержащего большое количество глинистых частиц, сначала происходит набухание, а только после этого начинается просадка. Величина набухания лёссовых пород зависит от плотности их сложения, содержания глинистых частиц, естественной влажности, засоленности и ряда других факторов.

Исследованиями авторов была выявлена определяющая роль процессов набухания в разуплотнении непросадочных и слабопросадочных лёссовых грунтов водного генезиса при переменном увлажнении — высушивании образцов при положительных температурах.

Работами Л. В. Передельского, В. П. Ананьева, Ж. Е. Рогаткиной, Нгуен Нгок Бика и др. [7—9] установлено, что в процессе циклического набухания грунтов их естественная структура разрушается, возникают необратимые деформации. Согласно результатам опытов, проведенных Ж. Е. Рогаткиной [9], Нгуен Нгок Биком [7], установлено, что в каждом цикле замачивания глинистых грунтов увеличивается как степень, так и давление набухания. Причиной, приводящей к нарушению способности грунта к набуханию, по мнению Ж. Е. Рогаткиной [9], является образование трещин, нарушающих структурные связи. Кроме того, в процессе увлажнения — высушивания может развиваться процесс кальцитизации, приводящий к некоторому упрочению структурных связей и снижению набухания.

Экспериментальные исследования Р. И. Злочевской и В. И. Дивисиловой [1] показали, что различия в набухаемости глин зависят от состава. Так, в монтмориллонитовых глинах при низких концентрациях внешнего раствора (0,1 н) поглощение влаги сверх адсорбционной связано главным образом с осмотическим процессом. В набухании каолинитовых глин могут принимать участие капиллярные силы, а в крупных

порах может задерживаться иммобилизированная влага, что связано с малой ионной активностью этих грунтов. Следовательно, деформации при набухании обусловлены преимущественно соотношением объема осмотической влаги и объема пор.

Учитывая присутствие в составе глинистой фракции лёссовых пород минералов группы монтмориллонита и смешанослойных с подвижной кристаллической решеткой, а также каолинита и хлорита, можно предположить, что при их увлажнении происходят описанные выше процессы.

Авторами были проведены модельные исследования роли циклического набухания в формировании просадочности лёссовых пород на образцах водного генезиса, отобранных из различных регионов СССР. Данные по их составу и свойствам представлены в табл. 1 (образцы 1 и 2). Изучались образцы ненарушенного сложения, заключенные в кольца большого диаметра, объемом 280 $см^3$, которые капиллярно водонасыщались при отсутствии внешнего давления. Деформация набухания фиксировалась с помощью индикатора часового типа. По достижению максимальных деформаций фильтровальной бумагой удалялся избыток воды из поддона и образцы высушивались при комнатной температуре до гигроскопической влажности. После этого определялись просадочные свойства по методу одной кривой, при этом нормальное давление составляло 0,3 МПа.

В процессе циклического набухания — усадки лёссового грунта величина набухания увеличивается. Определение этой величины на образце лёссового грунта пролювиального генезиса (обр. 1) проводилось относительно начальных размеров образца. Расчеты показали, что в течение пяти циклов она увеличивается от 7,5 до 14,1%. При испытании образца ательского среднего лёссовидного суглинка (обр. 2) фиксировалось только линейное набухание. Линейное приращение за 1 цикл составило 6,4%.

В результате набухания — усадки происходит изменение прочности индивидуальных контактов между структурными элементами грунта. После каждого цикла образцы становились более рыхлыми, возникли визуально заметные горизонтальные щелевидные поры, что связано с напряжениями усадки при дегидратации набухшей системы. Изменялась и форма образцов — уменьшался их диаметр и повышалась высота. Как видно, процесс набухания носит необратимый характер и приводит к общему разуплотнению породы и увеличению ее пористости (табл. 2).

Изменение структуры при этом хорошо наблюдается при электронномикроскопическом анализе сечения образца, перпендикулярного его горизонтальной поверхности. После I цикла структура обр. 1 стала ажурная, зернисто-агрегативная, более рыхлая. После пяти циклов набухания хорошо заметно уменьшение общей агрегированности породы; ее структура становится скелетной или зернистой, а сама порода — еще более рыхлой, появляются крупные поры (рисунок). В процессе набухания изменяется поровое пространство. По данным количественного обсчета РЭМ-изображений при увеличении $\times 150$ видно, что площадь контактов между глобулярными агрегатами уменьшается, увеличивается коэффициент связности пор, их средний диаметр, а также общая пористость (табл. 3). В результате структура образца приближается к структуре просадочной лёссовой породы.

Относительная просадочность данного образца составила после I цикла набухания 0,109, а после пяти циклов — 0,147. Изучение просадочности образцов ательского суглинка (обр. 2) показало, что после одного цикла набухания — усадки происходит повышение относительной просадочности грунта от 0,015 до 0,020.

Аналогичные результаты были получены авторами при исследовании разуплотнения искусственных образцов. В качестве первичного материала было использовано два различных лёссовых грунта, состав и свойства

Таблица 1

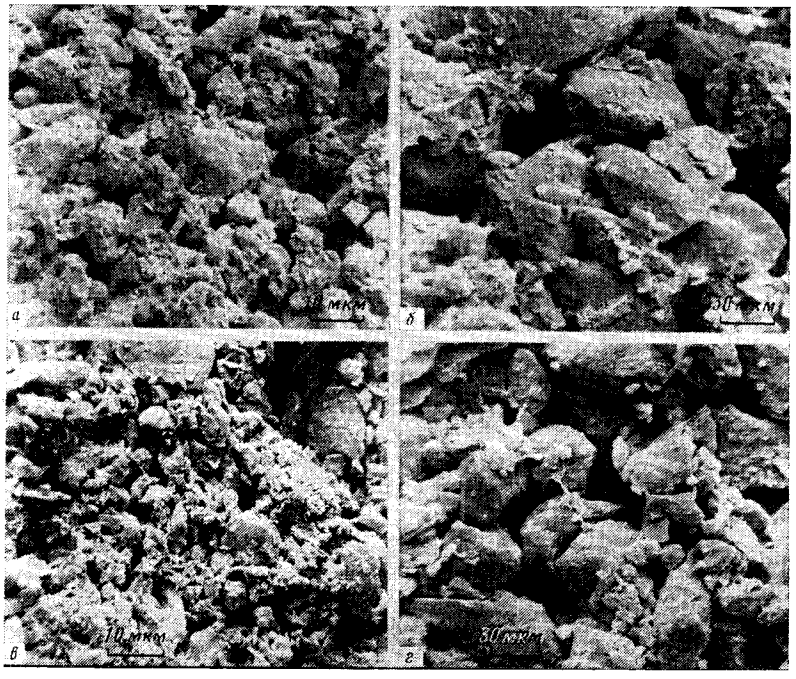
Характеристика лёссовых пород

№ образца	Регион	Место отбора и глубина	Геологический индекс	Название грунта, по классификации С. С. Морозова	Плотность, г/см³		Пористость, %
					твердой фазы	скелета	
1	Чирчик-Ахангаранская впадина	канал Джун 23 м	pIIts	Лёсс легкосуглинистый крупнопылевато-тонкопесчанистый	2,72	1,43	47,4
2	Прикаспийская впадина	пос. Св. Яр 8,2 м	laIIIat	Средний лёссовидный суглинок	2,71	1,72	37,5
3	Украинский щит	г. Запорожье, 2,0 м	laIIIvd	Лёсс среднесуглинистый крупнопылеватый	2,69	1,38	48,6
4	Прикаспийская впадина	г. Волжский 4,0—4,2 м	laIIIat	Средний лёссовидный суглинок	2,71	1,63	40,0

Таблица 2

Изменение плотности сложения лёссового грунта (обр. 1) в процессе циклического набухания — усадки

№ цикла	I		II		III		IV		V	
	n, %	γ, г/см³	n, %	γ, г/см³	n, %	γ, г/см³	n, %	γ, г/см³	n, %	γ, г/см³
Естественный образец	47,4	1,43	—	—	—	—	—	—	—	—
Набухание	—	—	50,9	1,33	51,4	1,32	51,9	1,30	54,1	1,25
Усадка	—	—	47,8	1,42	49,0	1,38	49,4	1,37	50,4	1,35



РЭМ-изображение лёсса pIIts (обр. 1): *а* и *б* — в естественном сложении; *в* и *г* — после пяти циклов набухания

которых представлены в табл. 1 (обр. 3 и 4). Эксперимент проводился в два этапа.

На первом этапе моделировались условия образования пойменного аллювия (или пролювия) в процессе самоуплотнения при свободном осаждении пылеватых частиц из воды. Для этого исходный лёссовый грунт замачивался водой до влажности 150% и тщательно перемешивался. Этим моделировалось разрушение естественного грунта водным потоком. Полученная суспензия заливалась в батарейный стакан объемом 5 л, где отстаивалась в течение нескольких часов, при этом соблюдалось условие свободного осаждения частиц. После полного их осаждения слой воды удалялся с помощью сифона. Осадок выдерживался при комнатной температуре в течение двух месяцев до полного его высыхания и образования «такыра» с плотной верхней коркой, разбитой трещинами усыхания. При этом толщина слоя осадка составляла 10—12 см.

На втором этапе оценивались изменения свойств осадка в результате его набухания при увлажнении и последующего воздействия отрицательной температуры. Из полученного осадка с помощью режущих колец объемом 280 см^3 вырезались образцы, которые через фильтровальную бумагу капиллярно насыщались водой. Таким способом моделировалось увлажнение высохших в течение лета пылеватых водных осадков осенними дождями. При увлажнении величина набухания образцов 3 и 4 составила соответственно 9,4 и 7,6%.

Затем одна серия образцов в кольцах помещалась в морозильную камеру на одни сутки, где температура понижалась постепенно от +18—20° С до —5° С. Так моделировалось замораживание водонасыщенного осадка в зимнее время. После извлечения образцов из камеры они оттаивали и выдерживались до полного высыхания при комнатной температуре в течение двух недель. Тем самым моделировался процесс быстрой деградации мерзлоты.

Таблица 3

Результаты количественной обработки РЭМ-изображений при увеличении×150

№ образцов	Состояние образцов	Коэффициент связности	Средний диаметр одной поры, мкм	Общая площадная пористость, %
1	естественное	68,4	24	38,7
	после 5 циклов	100	29	44,4
2	естественная	62,4	23	38,5
	после I цикла	95,6	32	45,5

Таблица 4

Изменение плотности сложения модельных лёссовых грунтов в процессе увлажнения, замерзания и высушивания

№ модельных образцов	3		4		4	
	n, %	γ, г/см³	n, %	γ, г/см³	n, %	γ, г/см³
Исходное состояние	45,4	1,47	43,9	1,52	44,3	1,51
После набухания при W	50,2	1,34	48,0	1,41	48,3	1,40
После усадки при $W_г$	—	—	45,0	1,49	—	—
После набухания и замораживания	54,3	1,23	—	—	48,7	1,39
После оттаивания и высушивания	48,7	1,38	—	—	46,1	1,46

Параллельная серия образцов после набухания не подвергалась промораживанию, а выдерживалась при комнатной температуре также в течение двух недель до полного высыхания. Таким образом моделировалось увлажнение сухих осадков водного генезиса и их последующее высыхание в условиях положительных температур. Обе серии исследовались на просадочность по методу одной кривой при давлении 0,2 МПа.

При водонасыщении модельных образцов происходит их значительное разуплотнение в результате набухания. При последующем высушивании до гигроскопической влажности отмечается усадка, величина которой для образца 4 составила 5,3%. Таким образом, образец после опыта не вернулся полностью в свое первоначальное состояние, он стал более рыхлым и менее прочным, его пористость увеличилась на 1% (табл. 4). Так, после одного цикла набухания — усадки сформировалась порода с коэффициентом относительной просадочности 0,102.

Появление просадочных свойств у пылеватого осадка в результате набухания — усадки можно объяснить следующим образом. Оседая в спокойных условиях, глобулярные агрегаты образуют плотную упаковку. В процессе уплотнения осадка они сближаются, что сопровождается перекрытием диффузных слоев глинистых частиц соседних глобул. При высыхании происходит упрочнение образовавшегося коагуляционного контакта [4], трансформация его в точечный контакт переходного типа с ионно-электростатическим типом связи, формирование ориентированной текстуры. При последующем водонасыщении в плотную упаковку глобул проникает вода, оболочки связанной воды, формирующиеся вокруг частиц, раздвигают их, происходит увеличение объема грунта с изменением характера контактов и переориентацией структурных элементов относительно друг друга. Вследствие этого ориентированная текстура пылеватого осадка трансформируется в беспорядочную. Одновременно становится меньше индивидуальных контактов. В процессе высыхания

системы беспорядочная ориентация структурных элементов, вероятно, сохраняется.

В ходе набухания — усадки модельных грунтов уменьшается число ионно-электростатических связей на одном контакте, что ведет к снижению его прочности, изменяется поровое пространство (табл. 3, рис. 1) и появляются просадочные свойства.

Промораживание набухших образцов приводит к дальнейшему их разуплотнению (табл. 4). Этот процесс идет сильнее в образце 3 за счет меньшей глинистости, чем в образце 4. По-видимому, при промерзании водонасыщенного осадка в основном происходит фиксирование разуплотненной после набухания структуры, что можно представить следующим образом. При кристаллизации льда в порах развивается давление, которое, вероятно, обуславливает внутреннюю перекомпоновку твердой фазы, фиксацию структурных элементов друг относительно друга, создание плотных макроагрегатов.

Вследствие увлажнения — промерзания — оттаивания — высушивания модельных образцов 3 и 4 их пористость увеличилась на 7 и 4% соответственно (табл. 4), т. е. после опыта ее величина стала практически такой же, как и пористость образцов естественных лёссовых пород, взятых для моделирования (табл. 1).

Испытания на просадочность показали, что в результате цикла увлажнения — замораживания при температуре −5° С и высушивания при положительной температуре формируется просадочная лёссовая порода с коэффициентом относительной просадочности равным 0,136 (обр. 3) и 0,102 (обр. 4). Просадочность модельных образцов оказалась больше, чем и природных, так как при моделировании не учитывалось влияния ряда факторов, например, кристаллизации плохо растворимых солей на контактах при фильтрации природных вод.

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что разуплотнение пылеватых осадков и непросадочных лёссовых пород происходит в основном за счет набухания. В ходе его отмечается перераспределение структурных элементов, изменение характера контактов между ними и порового пространства. В процессе промерзания набухшего образца фиксируется его разуплотненное состояние.

Эти зависимости могут быть использованы для объяснения двух, на первый взгляд, парадоксальных фактов. В работе [6] на примере лёссовых пород голодностепского комплекса в Узбекистане было показано, что близкие по составу и свойствам породы на орошаемых массивах обладают большей просадочностью, чем аналогичные разности на неорошаемых массивах. Модельными экспериментами, проведенными Нажем Абдул Муниром совместно с Н. В. Коломийцевым, было установлено, что при циклическом замачивании — высушивании образцов, взятых с неорошаемой территории, наблюдается повышение относительной просадочности, тогда как у образцов с орошаемой территории она практически не менялась. Сравнительная характеристика микростроения последних как естественного сложения, так и после одного и пяти циклов увлажнения — высушивания показывает их практически полное сходство. Каких-либо существенных изменений в пористости, числе и связности пор не наблюдалось.

В верхних горизонтах лёссовых толщ, где природное давление меньше прочности структурных связей, периодическое изменение влажности в процессе орошения приводит к формированию новой, более рыхлой структуры и увеличению просадочности грунтов. В конечном итоге лёссовая порода приходит в равновесие, что подтверждается данными моделирования [6].

Аналогичные результаты получены одним из авторов настоящей статьи Н. В. Коломийцевым применительно к лёссовым породам ательского возраста Прикаспийской впадины. Установлено, что при отсутст-

вии хвалынских глин, перекрывающих ательские слои в пределах отрицательных форм микрорельефа, где периодическое промачивание дождевыми и талыми водами может достигать глубины 5—6 м, сформировалась толща пород с более высокой просадочностью при одинаковой водонасыщенности по сравнению с отложениями того же возраста и состава, но залегающими на возвышенных хорошо дренированных участках.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что формирование просадочности пылеватых образований может происходить и в современных климатических условиях аридной зоны, что особенно важно при оценке инженерно-геологических условий лёссовых территорий.

Выявленные закономерности имеют большое практическое значение. Они позволяют объяснить разуплотнение лёссовых пород в бортах карьеров, на трассах дорог, при вскрытии котлованов, а также снижение эффекта предпостроечного уплотнения оснований трамбованием.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронин А. М., Минервин А. В.* Формирование просадочных свойств лёссовых пород юга Западной Сибири в результате промерзания — оттаивания и высушивания// Вестн. МГУ. Сер. геол. 1973. № 2. С. 62—69.
2. *Злочевская Р. И., Дивисилова В. И., Алексеенко Г. П., Крылова Т. П.* Исследование роли осмотических явлений при набухании глин//Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1973. С. 29—39.
3. *Минервин А. В.* Роль процесса гипергенеза в формировании просадочности лёссовых пород юга Сибири//Генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород: Тр. Междунар. конф. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 305—314.
4. *Минервин А. В., Комиссарова Н. Н.* Формирование структуры и текстуры просадочных лёссовых пород Минусинского межгорного прогиба//Инж. геология. 1979. № 1. С. 70—83.
5. *Минервин А. В., Комиссарова Н. Н.* Природа просадочности лёссовых пород//Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 16—31.
6. *Нажем Абдул Мунир.* Изменение физико-механических свойств лёссовых грунтов в процессе орошения (на примере дельты р. Акчадарьи). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1986.
7. *Нгуен Нгок Бик.* Циклическое набухание глинистых грунтов. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1984.
8. *Передельский Л. В., Ананьев В. П.* Набухание и усадка глинистых грунтов. Ростов н/Д. 1973. 144 с.
9. *Рогаткина Ж. Е.* Влияние переменного режима влажности на физико-механические свойства глин//Формирование и изменение физико-механических свойств горных пород под влиянием естественных и искусственных факторов. Л.: Изд-во Ленингр. обл. научно-технич. горн. об-ва, 1966. С. 35—42.
10. *Сергеев Е. М.* Генезис лёссов в связи с их инженерно-геологическими особенностями//Вестн. МГУ. Сер. геол. 1976. № 5. С. 3—15.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию
14.IV.1986

УДК 624.131.41

МУНИР НАЖЕМ АБДУЛ, КОРОЛЕВ В. А.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАГИ В ЛЁССОВЫХ ГРУНТАХ НА ОРОШАЕМЫХ И НЕОРОШАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Изучение характера изменения потенциала (давления) влаги ($P_в$) в грунтах позволяет объяснить природу их водно-физических свойств с точки зрения физико-химической механики и термодинамики [2, 3, 9, 10, 11], оценить пороговые влажности, при которых происходит изменение различных свойств грунтов.

По определению [2, 4, 9], полный потенциал влаги ($P_в$) — работа, которая должна быть затрачена для того, чтобы обратимо и изотермически перенести в заданную точку грунта бесконечно малое количество воды из объема чистой воды, находящегося при атмосферном давлении и на условном высотном уровне сравнения.

По физическому смыслу величина потенциала (давления) влаги ($P_в$) представляет собой отрицательное давление, удерживающее слой влаги на поверхности минеральных частиц грунта [4, 9]. Величина $P_в$ дает также возможность производить объективную сравнительную оценку влажности грунтов с разными свойствами, а грунты с одинаковыми значениями $P_в$ можно считать эквивалентно-влажными.

Лабораторные исследования изменения потенциала влаги в лёссовых грунтах из различных регионов СССР показали [7], что при наличии в лёссовых грунтах только влаги мономолекулярной адсорбции потенциал влаги составляет сотни МПа, по мере увеличения слоя влаги полимолекулярной адсорбции величина $P_в$ снижается до десятков МПа. При максимальной гигроскопической влажности (W_{mg}) потенциал влаги составляет 2—3 МПа, при капиллярном водонасыщении $P_в$ падает до величин менее 0,3 МПа, а при полном водонасыщении снижается до нуля.

Для анализа изменения свойств лёссовых грунтов при орошении территорий необходимо знать не только изменение потенциала влаги в процессе увлажнения, но и в процессе осушения, так как процесс орошения ведет к неоднократному увлажнению — высушиванию грунтов. Характер изменения потенциала влаги при осушении и при увлажнении, а также направленность изменения свойств лёссовых грунтов при этих процессах позволяют более полно расшифровать физико-химический механизм набухания, усадки, просадочности, деформируемости и других свойств лёссов.

Кроме того, исследование зависимости потенциала влаги от влажности лёссов, а следовательно, от степени их водонасыщенности, необходимо при решении разнообразных задач, связанных с передвижением влаги в зоне аэрации, когда поры грунта не полностью заполнены водой, грунты неравномерно увлажнены или когда существуют постоянные колебания влажности [3, 5]. Особое значение эти вопросы имеют при прогнозе увлажнения орошаемых территорий лёссовых пород. Правильный прогноз изменения инженерно-геологических характеристик лёссовых грунтов при преобладании процессов увлажнения над процессами высушивания при орошении или наоборот, а также при их равновесии возможен лишь с учетом всего комплекса факторов и в значительной

Характеристика дисперсности и физико-химических свойств лёссовых грунтов

№ п. п.	Название грунта (по С. С. Морозову)	Срок орошения, лет	Содержание фракций, %			Естественная влажность W, %	Гигроскопическая влажность W_g, %	Максимальная гигроскопическая влажность W_{mg}, %	Максимальная молекулярная влагоемкость W_{mmc}, %	Влажность нижнего предела пластичности W_p, %	Влажность верхнего предела пластичности W_l, %	Влажность набухания $W_н$, %
			песка	пыли	глин							
1	Суглинок тяжелый лёссовидный	8	4	93	3	24	0,20	7	17	23	29	27
2	Лёсс легкосуглинистый крупнопылеватый	12	3	91	6	27	0,38	1,75	17	24	33	29
3	Суглинок тяжелый лёссовидный	0	1	93	6	12	0,12	14	17	25	31	32
4	Лёсс легкосуглинистый крупнопылеватый	0	5	86	9	1	0,62	2,25	15	21	29	28
5	Лёсс среднесуглинистый крупнопылеватый	0	5	92	3	26	0,48	11,77	14	24	27	28

мере — при учете характера изменения потенциала влаги в ходе этих процессов.

Однако особенности изменения потенциала влаги в лёссовых грунтах при их увлажнении и осушении до настоящего времени изучены недостаточно. Поэтому в задачу настоящей работы входило выявление этих особенностей на лёссовых грунтах с орошаемых и неорошаемых территорий.

Методика и объекты исследования

В качестве объекта исследования были выбраны лёссы и лёссовидные суглинки (по классификации С. С. Морозова [6]) с неорошаемой и орошаемой территорией, отобранные в дельте р. Акчадарьи (Кара-Калпакская АССР). Изучались по два образца лёссов и лёссовидных суглинков с каждой территории. Характеристика дисперсности и физико-химических свойств исследуемых пород дана в таблице. Лёссы по гранулометрическому составу классифицируются как легкосуглинистые крупнопылеватые, а лёссовидные суглинки были представлены тяжелыми разностями. Сравнение образцов лёссов с орошаемых и неорошаемых территорий показывает, что при одинаковом минеральном составе лёссы орошаемых территорий имеют содержание глинистой фракции несколько больше, чем у лёссов неорошаемых территорий: соответственно 11 и 8% [8].

Содержание глинистых фракций в лёссовидных суглинках неорошаемых территорий составляет 6%, а на орошаемых — 3% (таблица). Такие различия гранулометрического состава и водно-физических свойств отобранных образцов, очевидно, должны обусловить и различные значения потенциалов влаги лёссов с орошаемых и неорошаемых территорий, поскольку известно [2, 9, 11], что давление влаги тесно связано с гранулометрическим и минеральным составом грунтов, емкостью поглощения и составом катионов, плотностью, пористостью и пластичностью грунтов.

Для определения потенциала влаги в лёссовых грунтах использовался метод равновесных сред [1]. Потенциалы влаги двух сред, находящихся в равновесии, равны между собой, поэтому если исследуемый образец привести в контакт с эталонным материалом, для которого известна зависимость потенциала $P_в$ от влажности, то после перераспределения влаги между исследуемым и эталонным образцом наступает

равновесие. При этом влажности обоих контактирующих образцов будут разные, а потенциалы равны (эквивалентно — влажные образцы).

Образцы исследуемых грунтов нарушенного сложения помещались в специальные ячейки из оргстекла. Половину каждой ячейки занимал исследуемый грунт, а вторую — каолин, используемый в качестве эталона, для которого известна зависимость $P_в(W)$. Ячейки герметично закрывались пластмассовой крышкой и парафином и оставлялись в горизонтальном положении, чтобы избежать влияния сил гравитации на перераспределение влаги, в термостатических условиях на 20—30 дней до наступления равновесия. Исходная влажность исследуемых образцов и каолина задавалась в пределах от 5 до 50%. Затем при наступлении равновесия из каждой ячейки отбирались пробы на влажность каолина и исследуемого лёсса. По тарировочной зависимости $P_в(W)$ в соответствии с направленностью процесса (для сушки или увлажнения) определялись значения $P_в$ для исследуемых лёссов. Затем по полученным данным строились графики зависимости $P_в=f(W)$ как на стадии сушки, так и на стадии увлажнения.

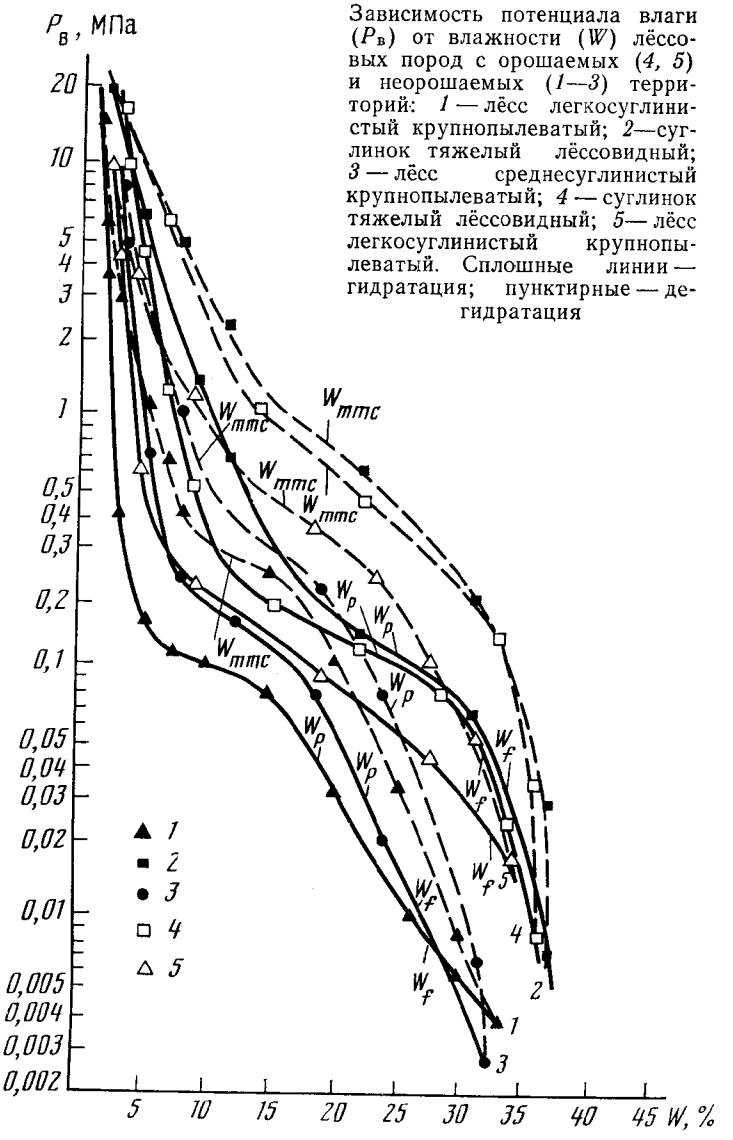
Результаты исследований и их обсуждение

Результаты определения зависимости потенциала влаги от влажности $P_в=f(W)$ исследованных грунтов представлены на рисунке. Зависимость $P_в=f(W)$ имеет характерную S-образную форму кривых. Как следует из полученных данных, максимальные значения потенциала влаги лёсса легкосуглинистого крупнопылеватого (неорошаемая территория) при гигроскопической влажности составляют 45,0 МПа, минимальные значения при влажности 33% составляют 0,004 МПа. Изменения потенциала влаги для ветвей дегидратации и гидратации происходят в одних и тех же пределах. Но потенциал влаги, определяемый при осушении (дегидратации), выше, чем потенциал влаги, полученный при увлажнении (гидратации), в 3—7 раз. При этом максимальные расхождения отмечаются в диапазоне влажности 2,5—7,0%. Здесь $P_в$ при осушении составляет при $W=2{,}5\%$ около 3,0 МПа, а при увлажнении $P_в$ при той же влажности достигает всего 0,43 МПа.

Наибольшие значения потенциала влаги лёсса среднесуглинистого крупнопылеватого (неорошаемая территория) при влажности $W=4\%$ составляют 10,0 МПа, минимальные значения при влажности 32% составляют 0,003 МПа. Потенциал влаги, полученный при осушении в указанном диапазоне влажности 4—32%, выше, чем потенциал влаги, полученный при увлажнении. Максимальные расхождения отмечаются в диапазоне влажности 5—20%. Так, при влажности 8% $P_в$ при осушении составляет около 1,08 МПа, а $P_в$ при увлажнении при той же влажности составляет 0,24 МПа.

Максимальные значения потенциала влаги суглинка тяжелого лёссовидного (неорошаемая территория) при гигроскопической влажности ($W_g=2\%$) составляют 20,0 МПа, а минимальные при влажности 37% составляют 0,008 МПа. Потенциал влаги, полученный при осушении в указанном диапазоне влажностей 2—37%, также выше, чем потенциал влаги, полученный при увлажнении. Максимальные расхождения отмечаются при влажностях 9—22%, и отношение $P_в$ при дегидратации и гидратации составляет 5—6.

Наибольшие значения потенциала влаги лёсса легкосуглинистого крупнопылеватого (12 лет орошения) при влажности 4% составляют 10,0 МПа, а минимальные значения отмечены при влажности 34% и составляют 0,22 МПа. Потенциал влаги, определенный при осушении, также выше, чем потенциал влаги, определенный при увлажнении, максимальные расхождения в 5—10 раз отмечены в интервале влажности 3—9%.



Зависимость потенциала влаги ($P_в$) от влажности (W) лёссовых пород с орошаемых (*4, 5*) и неорошаемых (*1—3*) территорий: *1* — лёсс легкосуглинистый крупнопылеватый; *2*—суглинок тяжелый лёссовидный; *3* — лёсс среднесуглинистый крупнопылеватый; *4* — суглинок тяжелый лёссовидный; *5*— лёсс легкосуглинистый крупнопылеватый. Сплошные линии — гидратация; пунктирные — дегидратация

Максимальные значения потенциала влаги суглинка тяжелого лёссовидного (8 лет орошения) при влажности 3% составляют 16,0 МПа. Минимальные значения получены при влажности 36% и равны 0,009 МПа. Максимальные расхождения в значениях потенциала влаги получены в диапазоне влажности 7—19%, отношение $P_в$ при дегидратации и гидратации составляет примерно 5.

Таким образом, анализ результатов, приведенных на рисунке, показывает, что потенциал влаги $P_в$ лёссов орошаемых территорий больше такового для тех же пород с неорошаемых территорий. Причем эта закономерность соблюдается как для режима гидратации, так и для дегидратации. Причинами увеличения потенциала влаги лёссов при их орошении, очевидно, является изменение их микростроения, выражающееся в разрушении водонеустойчивых структурных связей и изменении агрегированности тонкопылеватой и глинистой фракций, а также изменения в составе водорастворимых соединений и гранулометрического состава [8]. При одинаковых влажностях наиболее высокие значения потенциа-

ла влаги $P_в$ характерны для лёссов с невысокой пористостью ($\sim 45\%$) и с высоким содержанием тонкопылеватой и глинистой фракций.

В отличие от лёссов, лёссовидные суглинки имеют очень близкие значения потенциала влаги для грунтов с орошаемых и неорошаемых территорий (рисунок). Это обусловлено тем, что в лёссовидных суглинках даже при длительных сроках орошения изменения в их гранулометрическом составе, структуре и физико-химических свойствах происходят значительно медленнее, чем в лёссах.

Изучение изменения потенциала влаги ($P_в$) исследуемых лёссовых грунтов от различных показателей их состава и свойств показало, что увеличение содержания тонкопылеватой и глинистой фракций в породе ведет к росту $P_в$. В соответствии с этим увеличение числа пластичности пород также способствует росту $P_в$.

При естественной влажности значение потенциала влаги ($P_в$) коррелирует с показателями плотности породы — пористостью и плотностью скелета: чем выше пористость и соответственно ниже плотность скелета грунта, тем меньше значения потенциала влаги. Максимальные значения $P_в$ соответствуют наиболее плотному состоянию породы, что подтверждает результаты других исследований, полученных на глинистых породах.

Анализ взаимосвязи величин $P_в$, полученных при увлажнении и осушении образцов, с модулем общей компрессионной деформации ($E_{ок}$) и относительной просадочностью ($\delta_{пр}$) показал сложную зависимость, связанную, очевидно, с одновременным действием разнонаправленных факторов. Следует отметить, что надежная связь $P_в$ с другими параметрами, в том числе с $E_{ок}$ и $\delta_{пр}$, может быть получена лишь для образцов при одинаковой характеристической (а не естественной) влажности.

Сравнение значений потенциала влаги, полученных по ветвям осушения и увлажнения, показывает, что наибольшие расхождения $P_в$ характерны при невысоких влажностях в целом, меньших влажности нижнего предела пластичности и близких к влажности максимальной молекулярной влагоемкости.

Наличие гистерезиса потенциала влаги при увлажнении и осушении лёссовых грунтов указывает на неоднозначность количественных характеристик различных категорий воды, зависящих от направленности образования равновесной влажности у породы (увлажнение или высушивание). Гистерезис характерен не только для лёссовых, но, как отмечается во многих работах [1, 9], проявляется во всех глинистых породах. Причинами гистерезиса является неадекватность процессов адсорбции и десорбции воды в области адсорбционно-связанной воды, а также различие механизма процессов заполнения и опустошения капиллярных пор, связанное с гистерезисом смачивания в области капиллярной влаги.

Как известно, при орошении территорий лёссовых пород происходит неравномерное увлажнение массива, представляющего собой ненасыщенную зону. При этом закономерности массопереноса в ненасыщенной среде существенно отличны от таковых для пород при их полном водонасыщении. Решение задач массопереноса в грунтах при их неполном водонасыщении возможно на основе использования определений потенциала влаги [3, 9].

Так, влагоперенос в ненасыщенной зоне лёссовых грунтов определяется на основе $P_в$ уравнением Дарси-Клюта для скорости движения влаги в ненасыщенной среде:

$$v = K_в \left(\frac{dP_в}{dz} - 1 \right), \qquad (1)$$

где v — объемный единичный расход влаги; $K_в$ — коэффициент влагопереноса, зависящий от влажности W; z — высота точки над плоскостью сравнения. При этом скорость изменения влажности грунта $\partial W/\partial t$, или

его насыщенности, с учетом компонентов скорости фильтрации v_x, v_y, v_z может быть задана в форме

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{K_{\text{в}}(W)}{\gamma_{\text{в}}}\frac{\partial P_{\text{в}}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{K_{\text{в}}(W)}{\gamma_{\text{в}}}\frac{\partial P_{\text{в}}}{\partial y}\right)+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{K_{\text{в}}(W)}{\gamma_{\text{в}}}\frac{\partial P_{\text{в}}}{\partial z}\right)+\frac{\partial K_{\text{в}}(W)}{\partial z}, \qquad (2)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — плотность воды; t — время; $K_{\text{в}}(W)$ — коэффициент влагопереноса, зависящий от влажности.

Для одномерной фильтрации вдоль вертикальной оси z (при инфильтрации) это уравнение упрощается в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{K_{\text{в}}(W)}{\gamma_{\text{в}}}\frac{\partial P_{\text{в}}}{\partial z}\right)+\frac{\partial K\ (W)}{\partial z}. \qquad (3)$$

Связь между коэффициентом влагопереноса $K_{\text{в}}$ и коэффициентом диффузии влаги $D_{\text{в}}$ устанавливается соотношением

$$K_{\text{в}}=D_{\text{в}}\gamma_{\text{в}}\left(\frac{\partial W}{\partial P_{\text{в}}}\right), \qquad (4)$$

тогда уравнение (3) для одномерной фильтрации по оси z может быть дано в виде

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left(D_{\text{в}}\frac{\partial W}{\partial z}\right)+\frac{\partial K_{\text{в}}}{\partial z} \qquad (5)$$

Таким образом, зная изменение влажности лёссовых грунтов по глубине (профиль влажности) и зависимость $P_{\text{в}}=f(W)$ (см. рисунок), можно решить задачи определения коэффициентов влагопереноса и коэффициента диффузии влаги в толще.

Так, например, при известном значении коэффициента влагопереноса для различных значений влажности (W), зная зависимость $P_{\text{в}}(W)$ и стационарный профиль влажности в массиве, можно рассчитать объемные потери влаги на испарение (Q) с единицы площади массива по уравнению

$$Q=K_{\text{в}}S\,\text{grad}\,P_{\text{в}}, \qquad (6)$$

где $K_{\text{в}}$ — коэффициент влагопереноса для данного интервала влажностей; S — площадь сечения; $\text{grad}\,P_{\text{в}}$ — градиент давлений влаги в рассматриваемых точках по глубине на расстоянии z; Q — расход влаги на испарение.

Помимо задач нахождения параметров влагопереноса в лёссовых грунтах на основе $P_{\text{в}}$ могут быть решены вопросы, связанные с процессами миграции солей, рассоления и засоления лёссовых грунтов при их орошении и осушении с учетом естественного профиля влажности. В реальных природных условиях в зоне аэрации устанавливается относительно стационарный профиль распределения влаги по глубине над зеркалом грунтовых вод, соответствующий стационарному потоку влаги снизу вверх, который компенсируется испарением. В таких условиях вертикальный влагоперенос приводит к миграции солей снизу вверх и засолению грунтов выше зоны преимущественного распространения капиллярной влаги.

При орошении и осушении массива распределение влаги существенно усложняется. Так, орошение формирует встречный фронт влаги, обусловливающий миграцию солей сверху вниз в соответствии с направленностью потока инфильтрации. При этом наименее влажные породы могут располагаться в средней части зоны аэрации, а высокие значения потенциала влаги в таком горизонте способствуют накоплению в нем

растворимых солей. Наложение на этот процесс периодического увлажнения — высушивания еще более усложняет профиль влажности, при этом насыщенность пород становится переменной, что обусловливает нестационарный влагоперенос в рассматриваемой толще и соответственно сложный процесс миграции солей.

Выводы

1. При одинаковых характеристических влажностях лёссы орошаемой территории имеют более высокий потенциал влаги, чем лёссы неорошаемой территории.

2. Процесс длительного орошения приводит к увеличению значений потенциала влаги лёссов вследствие изменения их гранулометрического состава (увеличения дисперсности), геометрии порового пространства и физико-химических свойств. При этом разница в значениях потенциала влаги ветвей осушения и ветвей увлажнения лёссов орошаемых территорий становится меньшей, чем у грунтов различного гранулометрического состава неорошаемой территории.

3. Лёссовидные суглинки имеют близкие минимальные и максимальные значения потенциала влаги, что, видимо, связано с незначительными или более медленными изменениями гранулометрического состава и физико-химических свойств этих пород в результате орошения.

4. Чем выше дисперсность лёссовых пород, а также плотность скелета и ниже пористость, тем выше их значение потенциала влаги в исследуемом диапазоне влажностей, что подтверждает результаты других исследователей.

5. Для эквивалентного сравнения влажности лёссов с орошаемых и неорошаемых территорий следует учитывать предысторию формирования влаги в породе с точки зрения направленности процесса (гидратация или дегидратация).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Брилинг И. А.* Изучение капиллярных свойств.— В кн.: Методическое пособие по изучению инженерно-геологических свойств горных пород. Т. 2. М.: Недра, 1984. С. 310—316.
2. *Воронин А. Д.* Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1984. 204 с.
3. *Глобус А. М.* Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 355 с.
4. *Злочевская Р. И., Королев В. А., Калачев В. Я.*— Гидратация и ее влияние на свойства грунтов//Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. М.: Недра, 1985. С. 70—79.
5. *Королев В. А., Злочевская Р. И.* Энергетические особенности взаимодействия в системе вода — горная порода.//Подземные воды и эволюция литосферы. М.: Наука, 1985, т. II. С. 306—310.
6. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Т. 1.// Под ред. Сергеева Е. М., Максимова С. Н., Березкиной Г. М. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 346 с.
7. *Минервин А. В., Королев В. А.* Влияние температуры на гидрофильность и просадочность лёссовых пород. Инж. геология. 1984. № 3. С. 20—35.
8. *Мунир Н. А.* Изменение физико-механических свойств лёссовых грунтов в процессе орошения (на примере дельты р. Акчадарьи): Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1986. 19 с.
9. *Роде А. А.* Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. М., 1965. 663 с.
10. *Babcock K. L., Overstreet R.* Thermodynamics of soil moisture. A new application.// Soil Sci., 1955. V. 80. P. 257—263.
11. *Iwata S.* Thermodynamics of soil water. 1. The energy concept of soil water.//Soil Sci., 1972. V. 113. P. 162—166.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию
15.V.1986

УДК 624.131.436

ЛЕБЕДЕНКО Ю. П.

ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА КРИОГЕННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД

Изучение криогенного деформирования, обусловленного процессами промерзания-оттаивания — одна из важных задач физикохимии и механики мерзлых грунтов. К настоящему времени уже накоплен большой теоретический и экспериментальный материал по развитию деформаций в талых, мерзлых, промерзающих и оттаивающих породах [1, 3, 7, 8, 11, 12, 14—16 и др.]. Однако сложная взаимосвязь деформаций с комплексом характеристик тепломассообмена, физико-химических и механических процессов, протекающих в дисперсных влагонасыщенных грунтах, долгое время оставляла нерешенными вопросы механизма и кинетики криогенного деформирования, основных термодинамических условий его развития. Их решению и посвящена настоящая работа [1].

Как известно, общей причиной развития деформаций в дисперсных породах является наличие давлений и градиентов сил между компонентами, фазами, отдельными агрегатами и частями грунтовой системы и окружающей средой. Эти силы имеют различную природу (химические, молекулярные, ионно-электростатические, капиллярные и др.), области приложения и направления действия [12, 16 и др.]. При криогенном деформировании одновременно с изменением порового пространства и объема породы в целом происходит образование нового минерала — льда, перекомпоновка минеральных частиц и агрегатов, изменение их пространственной ориентировки и взаиморасположения, трансформация и разрыв структурных связей, появление новых контактов и типов связей между минеральными частицами и новообразующимся льдом и др. Опуская в этой работе вопросы структурообразования в промерзающих, оттаивающих и мерзлых породах, так как они имеют самостоятельный интерес и уже опубликованы ранее [5 и др.], остановимся более подробно на основных термодинамических условиях криогенного деформирования порового пространства.

Многочисленными исследованиями установлено, что в мерзлых породах вымерзает лишь часть воды, другая ее часть, находясь в области влияния поверхностных сил минеральных частиц и ионов растворенных солей, содержится в жидком состоянии, и взаимодействие между минеральными частицами и льдом осуществляется через пленки незамерзшей воды. В зависимости от влажности и температуры пород, а также температуры замерзания разных категорий связанной воды (прочно- и рыхлосвязанной, по Е. М. Сергееву) выделяются различные типы такого

[1] Работа проводилась на кафедре геокриологии под руководством зав. кафедрой, профессора Э. Д. Ершова. Ее результаты неоднократно обсуждались на секциях Совета по криологии Земли АН СССР, Ломоносовских чтениях МГУ, семинаре по физической химии дисперсных систем и др. Автор благодарен за целый ряд ценных замечаний и предложений, которые были высказаны в ходе этих обсуждений и способствовали выполнению исследований, членам-корреспондентам АН СССР П. Ф. Швецову и Е. Д. Щукину, профессорам С. С. Вялову, А. М. Глобусу, С. Е. Гречищеву, Л. И. Кульчицкому, Б. А. Савельеву, Н. В. Чураеву.

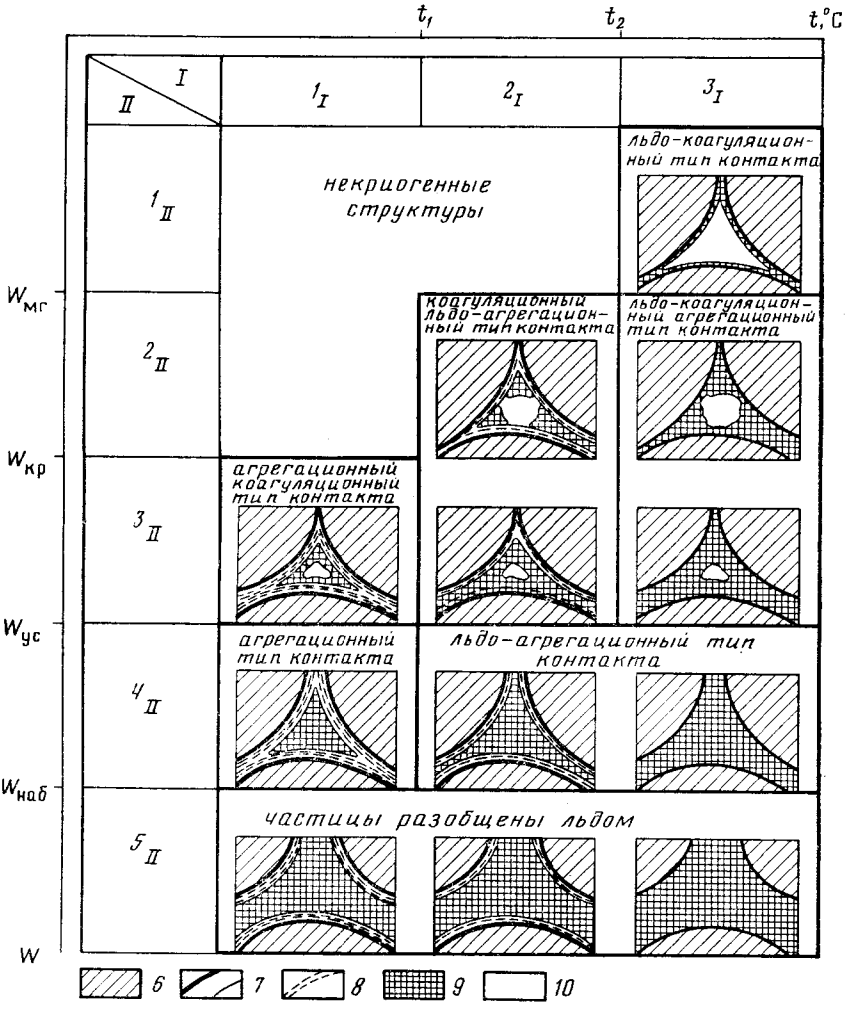


Рис. 1. Типы криогенных структур: I — типы по характеру связи (1_I — слабосвязанный, 2_I — связанный и 3_I — сильносвязанный); II — типы по содержанию льда-цемента (1_{II} — эпитаксиальный, 2_{II} — манжетный, 3_{II} — пленочный, 4_{II} — поровый, 5_{II} — базальный); *6* — минеральные частицы; *7* и *8* —прочно- и рыхлосвязанная вода соответственно; *9* — лед; *10* — поры, свободные от льда; t_1 и t_2 — температура замерзания соответственно рыхлосвязанной и прочносвязанной воды; $W_{мг}$ — максимальная гигроскопичность; $W_{кр}$ — критическая влажность перехода манжетного льда в пленочный; $W_{ус}$ — влажность предела усадки; $W_{наб}$ — влажность набухания

взаимодействия и типы криогенных структур (рис. 1, 2). Наличие безводных, т. е. непосредственных контактов между минеральными частицами и льдом имеет место лишь в области низких отрицательных температур (ниже −30 — −70° С) или в сухих слабовлажных породах. Таким образом, криогенное деформирование дисперсных влагонасыщенных пород происходит прежде всего в результате нарушения термодинамического равновесия между общим давлением водных пленок[2] и

[2] Понятие общего давления водных пленок в статье отличается по смыслу от термина, введенного и используемого в трудах Б. В. Дерягина и Н. В. Чураева, так как включает не только расклинивание давления тонких водных пленок, обусловленное действием поверхностных сил при перекрытии межфазных слоев, но и кристаллизационных, осмотических и других сил, развивающихся при фазовых переходах.

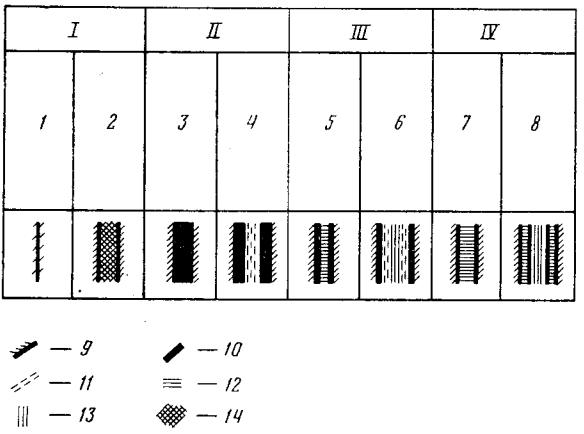


Рис. 2. Типы основных контактов мерзлых пород: I — безводные; II — водные; III — водно-ледовые; IV — ледовые; *1* — фазовые; *2* — кристаллизационные; *3* — коагуляционные, *4* — агрегационные; *5* — льдокоагуляционные; *6* — льдоагрегационные; *7* — льдовысокоэпитаксиальные; *8* — льдоэпитаксиальные; *9* — минеральная поверхность; *10* — прочносвязанная вода; *11* — рыхлосвязанная вода; *12* — высокоэпитаксиальный лед; *13* — эпитаксиальный лед; *14* — цементирующие вещества

прочностью структурных связей частиц, т. е. осуществляется «пленочный механизм» криогенного деформирования, обусловленный изменениями термодинамических параметров пленок незамерзающей воды в результате их течения и фазовых переходов.

Механическое равновесие между компонентами структуры порового пространства определяется влиянием двух противоположно направленных процессов: упрочнения структурных связей и роста общего давления водных пленок за счет действия кристаллизационных, поверхностных, осмотических и других сил. Развивающиеся при этом давления в пленках незамерзшей воды вызваны изменением целого ряда термодинамических параметров: температуры, энтропии, концентрации растворенных веществ, химического, электростатического и электромагнитного потенциалов и др. Основными из них, от которых главным образом зависит формирование при фазовых переходах давлений в водных пленках, являются температура, суммарное влагосодержание, удельное содержание растворенных веществ в жидкой фазе и изменение пористости. При рассмотрении их как независимых параметров общее приращение давления в пленках незамерзшей воды будет равно сумме частных составляющих

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_{WC_in} dt + \left(\frac{\partial P}{\partial W}\right)_{tC_in} dW + \\ + \sum \left(\frac{\partial P}{\partial C_i}\right)_{tWC_jn} dC_i + \left(\frac{\partial P}{\partial n}\right)_{tWC_i} dn, \qquad (1)$$

где P — общее давление водных пленок, действующее на минеральный скелет и лед в мерзлой породе; W — суммарная объемная влажность или суммарное содержание воды в поровом пространстве единичного объема породы; t — температура; $C_{i,j}$ — удельное содержание растворенных веществ в единице объема жидкой фазы (при C_i требуется, чтобы содержание всех веществ оставалось постоянным, а при C_j — аналогично C_i, кроме i-компонента); n — пористость.

Первый член уравнения (1) характеризует изменение давления в поровом пространстве в зависимости от температуры при постоянном объеме (постоянной пористости) и неизменном вещественном составе, т. е. при неизменных концентрациях растворенных веществ в жидкой фазе и суммарном влагосодержании. На начальном этапе замерзания свободной воды в крупных порах это изменение вызвано силами кристаллизации при фазовых переходах и в первом приближении может быть количественно оценено с помощью известного уравнения Клапейрона — Клаузиса, согласно которому при понижении температуры на 1° С гидростатическое давление повышается на 134 кг/см². Эту зависи-

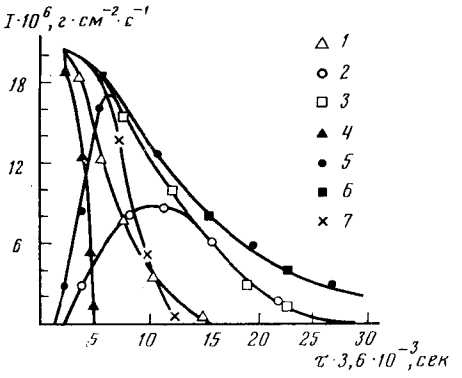


Рис. 3

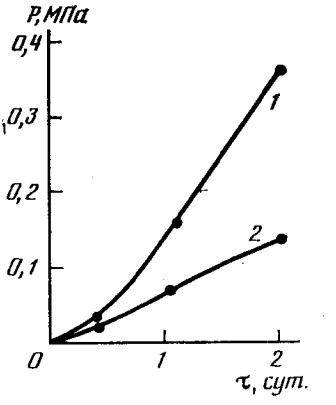


Рис. 4

Рис. 3. Кинетика внутреннего (*1, 4*), внешнего (*2, 5*) и суммарного (*3, 6* и *7*) миграционных потоков влаги из талой в промерзающую зону каолинитовой глины ($W^{нач}$ = =40%, $\gamma_{ск}^{нач}$ = 1,26 г/см³) при различной глубине залегания в ней внешнего безнапорного водного источника: *1, 2, 3* — внешний источник влаги расположен на глубине 24 см; *4, 5, 6* — на глубине 12 см; *7* — промораживание породы без внешнего источника влаги

Рис. 4. Удельные силы (напряжения) пучения, развивающиеся при промерзании суглинка в условиях открытой (*1*) и закрытой (*2*) системы (температура на поверхности грунта при промерзании —2° С) (по Ершову Э. Д. и Брушкову А. В.)

мость часто используют для оценки сил пучения. Однако она справедлива лишь при неизменном объеме и массе свободной воды, замерзающей в закрытых, абсолютно недеформируемых (жестких) водонасыщенных системах. В реальных открытых деформируемых грунтовых системах наблюдаются значительно меньшие величины давлений. Влияние на эту зависимость также оказывает неравенство давлений на жидкую и твердую фазы (формулу Гудзона, Скофилда, Эдлефсена и Андерсона и др.), что также необходимо учитывать при оценке давлений кристаллизации. В высокодисперсных породах (глинах и суглинках) содержится большое количество связанной воды, которая по своим свойствам и структуре отлична от свободной воды [4, 9, 10, 14 и др.]. Поэтому кристаллизационное давление, обусловленное замерзанием различных категорий связанной воды даже в условиях постоянства объема и массы, не будет равно значениям, определенным по уравнению Клапейрона — Клаузиса для свободной воды. В литературе пока что отсутствуют экспериментальные данные для этих зависимостей, в связи с чем при их оценке де-

Значения плотности внешнего ($I_{вш}$), внутреннего ($I_{вн}$) и суммарного (I_w) миграционных потоков в различных породах разного гранулометрического и минерального состава

Порода	$I_{вш}$,	$I_{вн}$,	I_w,
	10^{-6} г·см$^{-2}$·с$^{-1}$		
Глина каолинитовая	9,10	2,90	12,00
Глина полиминеральная (гидрослюдисто-монтмориллонитовая)	3,00	7,30	10,30
Глина монтмориллонитовая	0,10	8,00	8,10
Суглинок	0,08	1,80	1,88
Супесь	<0,08	<0,01	< 0,08

Примечание. В таблице приведены среднеинтегральные значения плотности потоков влаги из талой в мерзлую зону, рассчитанные по кривым $I_{вш}=f(\tau)$, $I_{вн}=f(\tau)$, $I_w=f(\tau)$. Породы промораживались в условиях открытой системы при grad t=1 град/см; водоносный горизонт расположен на глубине 0,15 м от поверхности охлаждения.

лаются допущения об идентичности поведения этих двух типов воды при фазовых переходах.

При уменьшении содержания незамерзшей воды и утоньшении водных пленок также возникает расклинивающее давление, обусловленное действием поверхностных сил [4], роль которого особенно велика в высокодисперсных породах с большой удельной активной поверхностью. Однако оно проявляется лишь при условии влагообмена с окружающей средой, т. е. в открытых системах при наличии источников свободной (несвязанной) воды или градиентов по содержанию незамерзшей (связанной) воды. В уравнении (1) это давление учитывается вторым членом, который характеризует его изменение в поровом пространстве пород в связи с переходом системы от закрытого к открытому типу (при постоянной температуре, объеме порового пространства и концентрации растворенных веществ), что обусловлено процессами влагопереноса и наличием движущих сил миграции (градиента общего термодинамического потенциала влаги). Теоретические и экспериментальные исследования движущих сил и причин миграции влаги в дисперсных породах достаточно полно освещены в специальной литературе. Поэтому, не останавливаясь на этом вопросе, рассмотрим здесь лишь роль в деформировании расклинивающего давления водных пленок, вызванного действием поверхностных сил.

Экспериментальное изучение влияния внешнего подтока влаги на процесс криогенного деформирования показало, что в водонасыщенных глинистых породах при переходе от закрытой к открытой системе промораживания плотность миграционного потока в мерзлую зону и ее деформации возрастают (рис. 3, таблица). При недопущении деформаций будет происходить рост общего давления в жидкой фазе в результате увеличения расклинивающего действия водных пленок, которое достигает своих максимальных значений при неизменном объеме порового пространства, что характеризует второй член уравнения (1). В качестве примера такой зависимости можно привести экспериментальные данные по одностороннему промораживанию дисперсных влагонасыщенных пород (рис. 4).

Очевидно, что воздействие на минеральные частицы может быть вызвано переносом влаги во всех ее фазах: жидкостным переносом, пароперепосом и вязкопластическим течением льда. Поэтому членом $(\partial P/\partial W)_{tc_i^n} dW$ учитывается суммарный эффект изменения давления, а dW отвечает суммарному ее приращению. Вместе с тем значение вязкопластического течения льда в поровом пространстве мало. Этот процесс может иметь место лишь при длительном (в геологическом времени) нахождении мерзлых пород в градиентном поле механических давлений, в связи с чем он пока слабо исследован. В водонасыщенных дисперсных породах роль пароперепоса в общем потоке ничтожна. Поэтому основной вклад в расклинивающее действие водных пленок вносит миграция жидкой фазы [2, 5 и др.]. Повышение или понижение давления в пленках незамерзшей воды при постоянных температуре, объеме порового пространства и концентрации растворенных веществ в жидкой фазе будет зависеть от направленности движущих сил миграции и соответственно потока влаги. При ее оттоке из порового пространства породы общее давление будет уменьшаться и, наоборот, возрастать при обратном направлении движения.

Третий член уравнения (1) характеризует изменение давления в водных пленках, обусловленное изменением концентрации растворенных веществ и химического потенциала при постоянных температуре, суммарной объемной влажности и пористости пород. Влияние каждого элемента оценивается при постоянной концентрации остальных, а затем суммируется. Основными причинами изменения концентраций в жидкой фазе в этих условиях могут быть: миграция растворенных веществ; хи-

мические реакции (обменные, окисления-восстановления и др.); криогенное концентрирование, связанное с кинетикой фазовых переходов, т. е. выделение пресного льда в зависимости от скорости замерзания воды в порах и др. Эти процессы чаще всего действуют совместно, дополняя и регулируя друг друга. Так, увеличение концентрации ионов при их миграции может привести к химическим реакциям, а криогенное концентрирование — вызвать миграцию элементов. Не останавливаясь здесь на специальных вопросах протекания химических реакций и связанных с ними процессов в мерзлых породах, следует в целом отметить следующее. Преобразования химико-минерального состава, с одной стороны, обусловливают изменение химического потенциала, что приводит к массопереносу и развитию давления в водных пленках за счет осмотической составляющей, с другой — сдвигают фазовые равновесия, вызывая фазовые переходы, что также влечет за собой изменение общего давления при постоянных температуре, суммарном влагосодержании и пористости.

Проведенный комплекс экспериментальных исследований диффузии ионов и осмотического переноса влаги при различных концентрациях растворов солей, взаимодействующих с незасоленными мерзлыми водонасыщенными породами разного гранулометрического и химико-минерального состава, влажности и плотности в широком диапазоне отрицательных температур при различных активной пористости, проницаемости, ионной проводимости и др., позволил выявить специфические особенности их развития.

Как известно, в результате взаимодействия ионов соли с растворителями изменяется не только химический потенциал ионов, но и растворителя. Поэтому при массообмене необходимо рассматривать как диффузию и диализ ионов, так и нормальный и обратный осмос воды, ее ультрафильтрацию, термоосмос и др. При этом градиенты общего термодинамического потенциала влаги между мерзлой породой и внешним раствором определяются, с одной стороны, химическим составом и концентрацией растворенных солей, с другой — дисперсностью, химико-минеральным составом, строением и температурой самих пород. В том случае, если общий термодинамический потенциал влаги в растворе выше его значений для грунтовой влаги, возникает градиент движущей силы миграции и перенос ее из раствора в породу (т. е. происходит обратный осмос воды). И, наоборот, если общий термодинамический потенциал влаги во внешнем растворе ниже его значения для мерзлой породы, происходит нормальный осмос, т. е. перенос воды из породы в раствор. Однако в мерзлых грунтах последний имеет малую интенсивность, поскольку менее связанная влага содержится в поровом пространстве в виде льда и не может мигрировать из породы.

В мерзлых незасоленных породах при взаимодействии их с концентрированными растворами солей развитие нормального осмоса возможно лишь после перехода порового льда в воду. Поэтому незначительный нормальный осмотический поток из оттаивающих в ходе засоления пород имеет место при высоком содержании в них слабосвязанной породой влаги, т. е. преимущественно в супесях и песках. В целом же для мерзлых дисперсных пород в процессе их взаимодействия с растворами солей характерен аномальный осмос (рис. 5). В условиях недопущения деформаций при постоянстве температуры, суммарной объемной влажности и пористости общее давление в поровом пространстве, создаваемое разностью химических потенциалов ионов, описывается третьим членом уравнения (1), а давление, вызванное миграционным потоком для каждого квазистационарного состояния в ионном распределении,— вторым членом этого уравнения.

Процессы диффузии ионов солей, как известно, протекают значительно медленнее передачи давления по водным пленкам. Поэтому скорость

миграции, интенсивности влагонакопления и деформирования мерзлых пород (рис. 6) выше, чем скорости диффузии в них ионов солей, интенсивности засоления и размокания. При этом мерзлые породы, являясь полупроницаемой мембраной, более проницаемы для молекул воды, чем для ионов солей.

В мерзлых породах в отличие от талых особенно велико влияние температуры на развитие процессов обратного осмоса пленок воды, катионной и анионной проницаемости, засоления и реакций обмена, размокания и деформирования. С ее понижением интенсивность развития этих процессов в целом уменьшается, а пластическое деформирование сменяется разрушением сплошности и образованием зияющих трещин (рис. 7).

Четвертый член уравнения (1) описывает уменьшение давления в водных пленках, вызванное изменением объема порового пространства, т. е. определяет зависимость между давлениями и деформациями при неизменных температуре и вещественном составе. В твердых телах деформации обусловливают, как известно, изменения механических напряжений, а в газах — энтропии. В жидких водных пленках развитие давлений в зависимости от деформаций складывается из двух составляющих

$$P = -\left(\frac{\partial U}{\partial n}\right)_{TWC_i} + T\left(\frac{\partial S}{\partial n}\right)_{TWC_i}, \qquad (2)$$

где U — внутренняя энергия; T — температура по Кельвину; S — энтропия. Первый член уравнения (2) определяет составляющую давления, обусловленную внутренней потенциальной энергией взаимодействия частиц, т. е. механическими напряжениями (при $T=0$ — общее давление будет определяться только механическими напряжениями); второй — составляющую давления, обусловленную кинетической энергией частиц (для пара общее давление в основном определяется вторым членом).

Развитие давлений в пленках незамерзшей воды, обладающих вязкопластическими свойствами, связано с обеими составляющими, т. е. увеличение объема порового пространства в условиях постоянства температуры и вещественного состава приводит к падению давления как за счет уменьшения механических напряжений, так и за счет энтропии. Следовательно, при криогенном деформировании, с одной стороны, развиваются давления в водных пленках в связи с изменениями температуры, суммарной влажности и концентрации растворенных веществ; их вклад определяется первыми тремя членами уравнения (1), с другой стороны — происходит изменение давлений, обусловленное развитием деформаций. Связь деформаций и давлений определяет четвертый член уравнения (1).

Очевидно, что основным условием деформирования порового пространства является превышение общего расклинивающего давления водных пленок над прочностью структурных связей породы. Для промерзающих пород характерен рост общего расклинивающего давления в пленках незамерзшей воды с увеличением прочности структурных связей. При этом особое значение при криогенном деформировании имеют различия в фазовых переходах влаги, находящейся в порах породы (поровой) и на контактах минеральных частиц (контактной и манжетной).

Рассмотрим динамику изменения механического равновесия между общим давлением пленок незамерзшей воды и прочностью структурных связей при промерзании водонасыщенных пород. Весь процесс замерзания можно разбить на три периода. Первый связан с замерзанием свободной и слабосвязанной воды, находящейся в крупных порах, при этом основное значение в изменении пленочного давления имеет кристаллизационное давление, а роль поверхностной энергии минеральных частиц невелика. В этот период структурное сцепление, обеспечивающее стабильность порового пространства, осуществляется в основном структур-

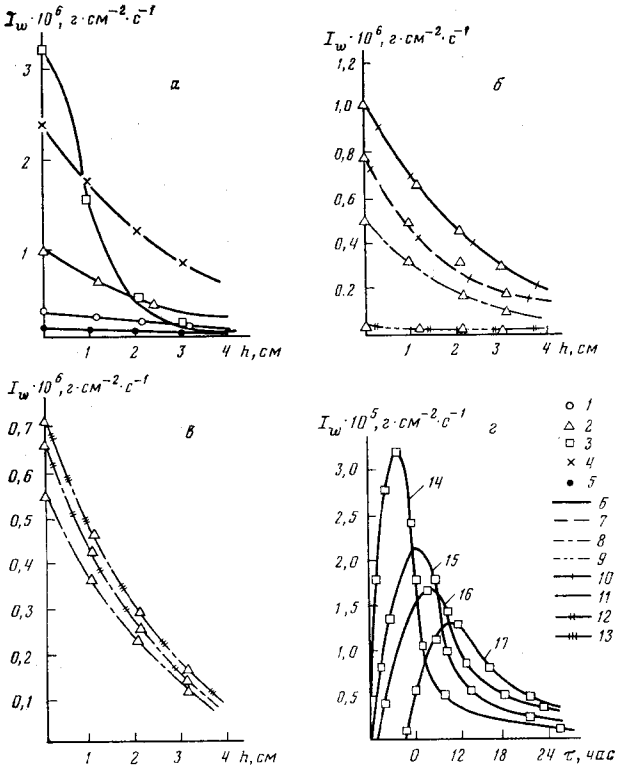


Рис. 5. Изменение плотности миграционного потока влаги (I_w) в мерзлых засоляемых породах, контактирующих с водным раствором NaCl различных концентраций в изотермических условиях: *а, б, в* — по высоте образцов (h) и *г* — во времени (τ); *1* — супесь, *2* — суглинок, *3, 4* и *5* — глины каолинитовая, полиминеральная и монтмориллонитовая; *6—8* и *9* — температуры пород соответственно —1,5, —4, —8 и —20° С; *10—13* — концентрации растворов NaCl 0,1, 0,2, 0,4 и 0,8 нормальности; *14, 15, 16* и *17* — кинетика потоков влаги в различных сечениях образца соответственно, в 0, 1, 2 и 3 см от контактного сечения

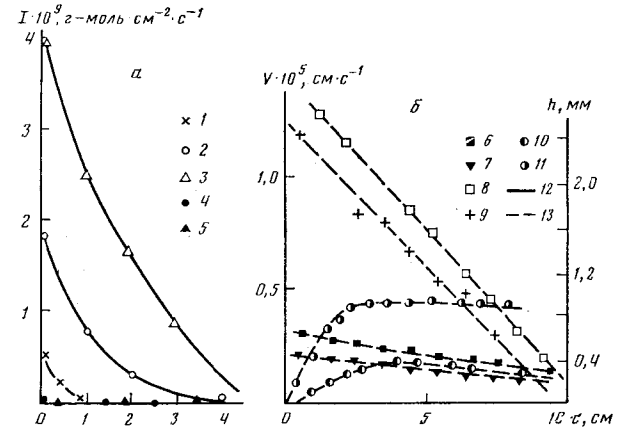
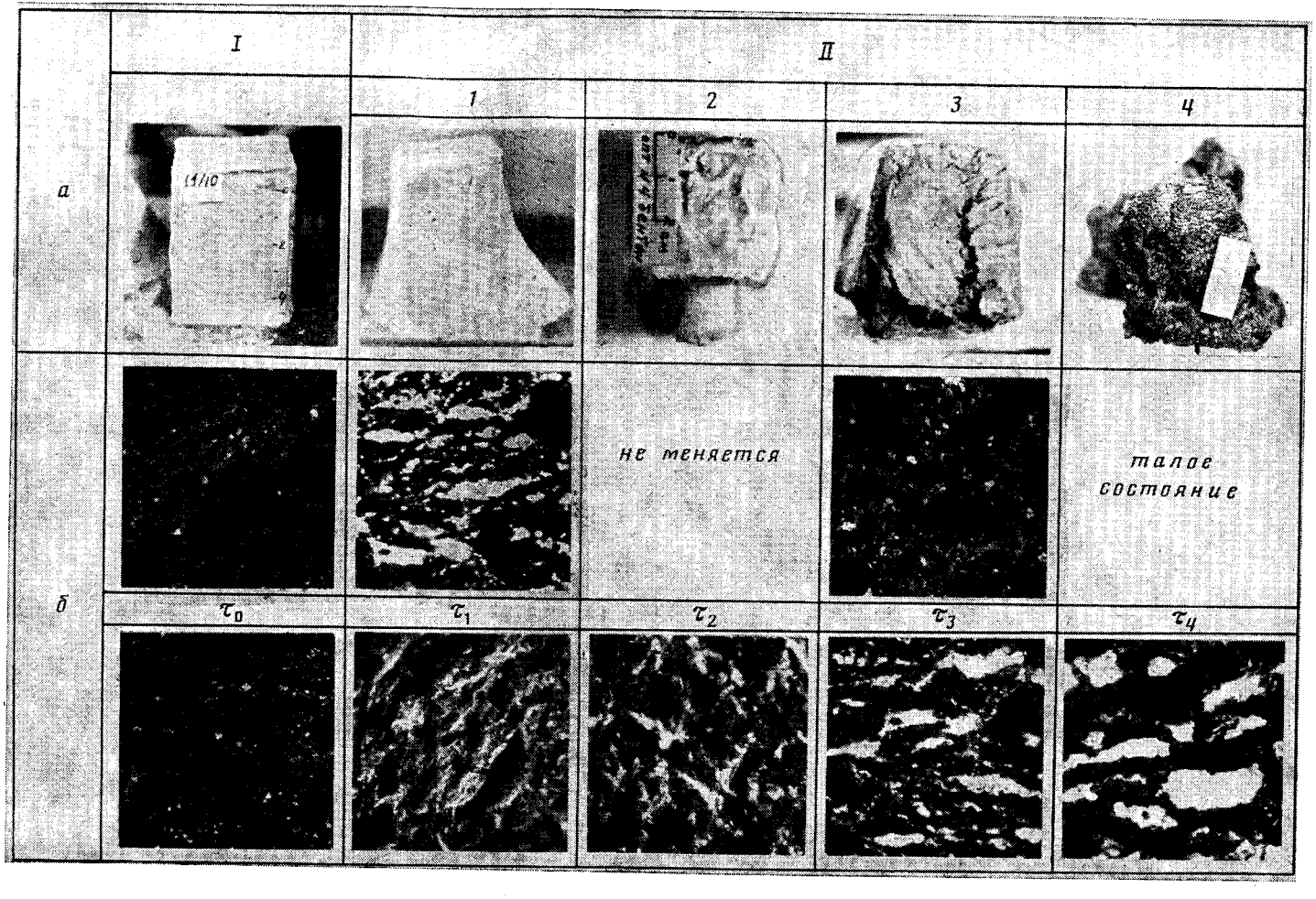


Рис. 6. Характер изменения плотности миграционных потоков Na^+, Cl^- и H_2O (I) скоростей миграции влаги и пучения (V), а также абсолютных деформаций (h) мерзлых незасоленных пород по высоте и во времени при взаимодействии их с 0,1 и 0,8 нормальным раствором NaCl (*а* и *б* соответственно) в изотермических условиях (t = —4° С) в зависимости от внешней нагрузки: *1, 2* и *3* — без нагрузки соответственно Na^+, Cl^- и H_2O; *4* и *5* — при нагрузке 0,5 МПа Cl^- и H_2O; *6* и *7* — скорости миграции влаги и пучения при нагрузке 0,2 МПа; *8* и *9* — то же без внешней нагрузки; *10* и *11* — абсолютные деформации под нагрузкой 0,2 МПа и без нее; *12* и *13* — глины каолинитовая и полиминеральная (гидрослюдисто-монтмориллонитовая)


I
II
1
2
3
4
а
б
(1/10
не меняется
талое состояние
τ_0
τ_1
τ_2
τ_3
τ_4

ными связями, действующими в местах наибольшего сближения частиц и перекрытий межфазных слоев, т. е. в местах их контактов. Взаимодействие между частицами здесь происходит через пленки связанной воды, замерзающей при более низкой отрицательной температуре, а типы таких контактов (рис. 2) определяются величиной контактного взаимодействия. В мерзлых породах наиболее часто встречаются коагуляционный, льдокоагуляционный, агрегационный (дальний коагуляционный, по Е. Д. Щукину, В. И. Осипову, И. В. Ефремову 6, 12, 16) и льдоагрегационный типы. Роль в криогенном деформировании каждого из них, а также пор различных размеров зависит от дисперсности и химико-минерального состава, макро- и микростроения пород, их влажности, плотности и температурных условий замерзания различных категорий влаги.

Во второй период при замерзании рыхлосвязанной влаги на контактах частиц, в мелких порах внутри агрегатов и в более крупных, где фазовые переходы свободной воды уже завершились, прочность контактного взаимодействия возрастает, а структура с агрегационным типом контактов переходит в криогенную с льдоагрегационным типом (рис. 1). Рост кристаллизационного давления при этом уже не приводит к увеличению гидростатического давления в поровом пространстве, занятом льдом, а обусловливает в основном изменения давлений в скелете породы, т. е. вызывает развитие эффективных давлений [3]. Одновременно с кристаллизацией и утоньшением пленок воды на контактах возрастает их расклинивающее давление, обусловленное действием поверхностных сил, что также увеличивает эффективные давления в скелете породы. Это в итоге снижает прочность структурных связей внутрипорового льда, цементирующего минеральные частицы. В целом же стабильность структуры порового пространства при этом определяется соотношением давления водных пленок на контактах минеральных частиц и прочностью льдоцементационных связей внутри пор. Однако расклинивающее действие водных пленок, обусловленное поверхностными силами, проявляется лишь при их неразрывности и наличии внешнего источника влаги (т. е. существовании активной пористости, обеспечивающей неразрывное вязкопластическое течение этих пленок). Внешним источником может служить влага талой зоны, а также более толстые водные пленки в мерзлой зоне, связанные с неравномерным их вымерзанием в градиентном температурном поле и др.

Криогенное деформирование тонкопористых пород с коагуляционным типом контактов (поровое пространство которых заполнено незамерзшей

Рис. 7. Общий вид деформированных и разрушающихся мерзлых пород (*а*) и их криогенное микростроение (*б*; масштаб: 1 см — 0,4 мм; минеральный скелет — темный тон, лед — светлый), образовавшиеся при взаимодействии с водными растворами солей в изотермических условиях: I и II исходное и деформированное состояния соответственно; *1* — глина каолинитового состава, деформированная процессами массообмена и сегрегацией льда (t=—1,5° С, раствор NaCl 0,2 н., длительность опыта τ=3 ч); *2* — глина монтморилонитового состава, в которой отсутствуют процессы массообмена и сегрегации льда, а происходит лишь ее размокание (t=—1,5° С) раствор NaCl 0,4 н. τ= =7 сут); *3* — суглинок полиминеральный, диффузия солей в котором при t=—8° С за 7 сут приводит к разрыву сплошности и образованию трещин (подобные разрушения происходят также в глинах каолинитового и полиминерального состава в области высоких отрицательных температур при взаимодействии с более активными в миграционном отношении растворами солей Na_2CO_3, $CaCl_2$ и др.); *4* — глина полиминеральная, прошедшая стадии как массообмена и сегрегации льда, так и размокания (t=—1,5° С, раствор NaCl 0,2 н, τ=7 сут); τ_0, τ_1, τ_2, τ_3 и τ_4 — преобразование микростроения глины каолинитового состава в процессе ее засоления NaCl 0,1 н при t=—1,5° С соответственно через 0, 3, 5, 7 и 72 ч

---

[3] Эффективное давление, понятие которого было введено К. Терцаги, используется в настоящее время при описании процессов фильтрационно-компрессионного деформирования; при криогенном деформировании оно обусловлено не внешними, а внутренними силами, развивающимися при переходе в лед пленок незамерзшей воды.

водой) во второй период замерзания аналогично рассмотренному выше. Так, стабильность структуры при этом обеспечивается прочностью контактного взаимодействия минеральных частиц, а увеличение общего давления обусловлено действием не только кристаллизационных, но и поверхностных сил.

Третий период связан с замерзанием прочносвязанной воды. Значение этих фазовых переходов в криогенном деформировании мало, так как количество этой категории воды невелико даже в высокодисперсных глинистых породах, а отсутствие сплошности водных пленок и малая их подвижность не способствуют формированию высоких расклинивающих давлений. При замерзании связанной влаги на коагуляционных контактах минеральных частиц прочность их взаимодействия значительно возрастает, а структура с коагуляционным типом контактов переходит в криогенную с льдокоагуляционным типом (рис. 1). С упрочнением структурных связей наблюдается затухание криогенных деформаций и мерзлая порода начинает себя вести как твердое тело при температурных деформациях.

При наличии движущегося фронта промерзания важным является взаимодействие талой, промерзшей и мерзлой зон. Как было показано выше, развитие общего расклинивающего давления водных пленок связано с периодом замерзания свободной и рыхлосвязанной влаги. Следовательно, в промерзающих породах основное значение в криогенном деформировании будут иметь: 1) интенсивные фазовые переходы свободной воды в крупных порах агрегатов и в межагрегатном поровом пространстве в I зоне (от фронта промерзания до изотермы с температурой замерзания рыхлосвязанной воды); 2) фазовые переходы рыхлосвязанной влаги в зоне II (от температуры начала замерзания рыхлосвязанной до температуры замерзания прочносвязанной воды). Развивающиеся процессы криогенного деформирования в этих зонах соответствуют описанному выше первому и второму периодам замерзания.

Рассмотрим особенности криогенного деформирования в этих зонах в зависимости от состава, строения и условий промерзания водонасыщенных пород. Для грубодисперсных пород, обладающих большими размерами пор и соответственно высоким содержанием в них свободной воды, но значительно меньшим числом контактов и прочностью их связей, характерно интенсивное криогенное деформирование в зоне I и практически полное его отсутствие в зоне II. Увеличение объема порового пространства, вызванное интенсивным деформированием в первой зоне, приводит к росту расстояния между частицами и к уменьшению их контактного взаимодействия. В результате формирования криогенной структуры с базальным типом льда-цемента (рис. 8, *а*) происходит преобразование контактных типов связей в площадные (или объемные, по Э. Д. Ершову). В породах с поровым типом льда-цемента величина расклинивающего давления водных пленок, обусловленная действием поверхностных сил, значительно меньше прочности льдоцементационных связей внутрипорового льда. Поэтому при дальнейшем понижении температуры сохраняется устойчивая криогенная структура.

С увеличением дисперсности пород содержание свободной влаги в крупных порах уменьшается, а число контактов возрастает, что способствует повышению стабильности структуры с агрегационными и коагуляционными типами контактов (рис. 1) в зоне I и сохранению активной пористости, а, значит, и неразрывности водных пленок между талой и промерзающей зоной II. Криогенное деформирование зоны II, связанное главным образом с фазовыми переходами влаги на контактах частиц и развитием эффективных давлений на минеральный скелет, увеличивается с ростом числа контактов (рис. 8, *б*). Это, в первую очередь, вызвано возрастающей ролью расклинивающего давления водных пленок и обусловленного действием поверхностных сил при замерзании связанной

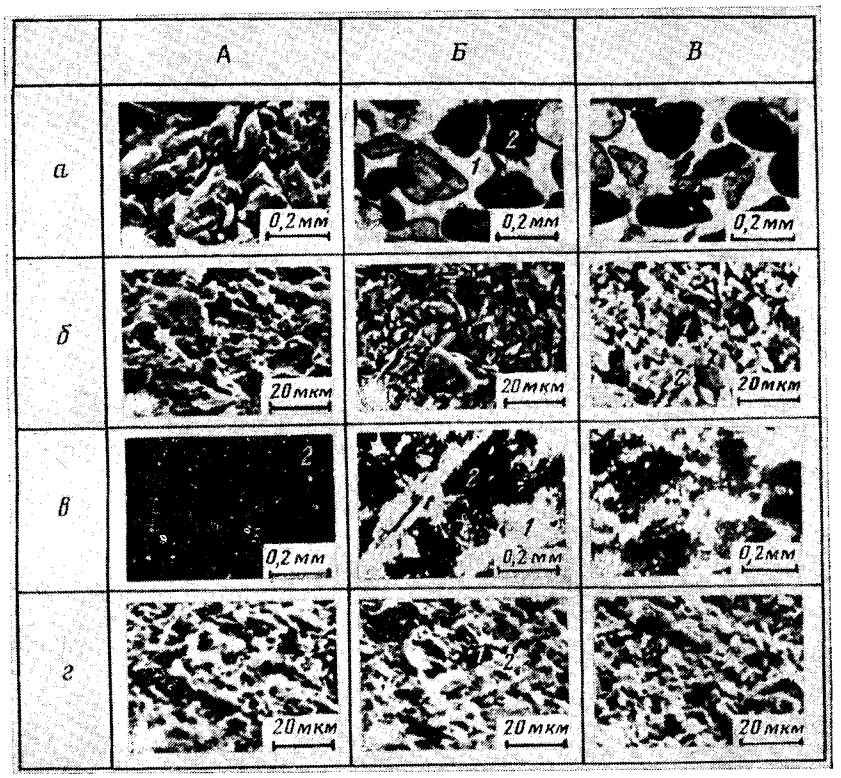


Рис. 8. Особенности формирования криогенных структур в промерзающих породах различного состава и строения; *а* — песок, *б* — суглинок, *в* и *г* — глины неконсолидированная (ил) и консолидированная; А — структура талой исходной породы, Б и В — промерзающей (I) и мерзлой (II) зон соответственно; *1* — лед, *2* — минеральный скелет

влаги, и неразрывностью пленочного течения незамерзшей воды через зону I.

Криогенное деформирование высокодисперсных пород, содержащих большое количество мелких пор внутри агрегатов, заполненных связанной водой, также вызвано ростом расклинивающего действия водных пленок и увеличением уже внутриагрегатной пористости. Стабильность структуры агрегатов при этом определяется прочностью коагуляционных контактов внутри них и общим давлением водных пленок, находящихся в внутриагрегатном поровом пространстве.

Большое значение в рассматриваемых процессах имеют влажность и плотность пород. Влажные слаболитифицированные дисперсные породы с агрегационным типом контактов характеризуются большим содержанием свободной и слабосвязанной воды, слабыми силами взаимодействия частиц, которые легко преодолеваются кристаллизационным давлением при замерзании слабосвязанной межагрегатной влаги в зоне I. Это приводит к увеличению расстояния между взаимодействующими частицами и к уменьшению контактного их взаимодействия. Интенсивное деформирование порового пространства с разрывом структурных связей и образованием базального типа льда-цемента (рис. 8, *в*) вызывает нарушение сплошности активной влагопроводящей пористости и неразрывности пленок незамерзшей воды между талой и промерзающей зоной II. Это является причиной того, что расклинивающее давление водных пленок и деформирование промерзающей зоны II во влажных слаболитифицированных породах незначительны (рис. 8, *в*). Следовательно, с уве-

личением влажности и снижением плотности вклад расклинивающего давления, обусловленного действием поверхностных сил, миграционных и осмотических процессов, описываемых вторым и третьим членами уравнения (1), в криогенное деформирование уменьшается, а кристаллизационного давления, связанного с замерзанием свободной воды в зоне I, возрастает и имеет место иной (прото- или ортотропный) механизм деформирования, обусловленный кинетикой роста кристаллов льда [13 и др.]. Ввиду невысокой прочности структурных связей деформации здесь происходят под действием малых давлений в водных пленках.

В литифицированных дисперсных породах с коагуляционным типом контактов роль фазовых переходов в криогенном деформировании отлична от рыхлых пород. Большее число контактов с высокой прочностью обеспечивает большую устойчивость структуры к действию кристаллизационного давления, которое возникает при фазовых переходах малого количества свободной влаги в промерзающей зоне I. В результате формируются криогенные структуры с поровым льдом (рис. 8, *г*), цементирующим лишь отдельные крупные поры, содержащие свободную и слабосвязанную воду. Это способствует сохранению неразрывности водных пленок между талой и зоной II. Наличие такой структуры и внешнего источника влаги (в условиях открытой системы) приводит к четко выраженному процессу миграционно-сегрегационного льдовыделения, т. е. к дифференциации породы на ледяные и минеральные прослои со слабо деформированной структурой порового пространства в промерзающей зоне II (рис. 8, *г*).

Влияние скорости промерзания на криогенное деформирование пород прежде всего отражается на кинетике протекания процесса. С ее ростом увеличиваются скорости фазовых переходов и соответственно возрастает роль кристаллизационных сил в развитии общего давления водных пленок, повышение которого приводит к росту скорости деформаций. Последнему также способствует уменьшение прочности структурных связей в результате разрыва части из них. Все это способствует сдвигу равновесия в сторону нарастания скорости деформирования, сопровождающегося разрушением контактного взаимодействия минеральных частиц скелета породы.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что важнейшую роль в криогенном деформировании влагонасыщенных дисперсных пород играет пленочный механизм, обусловленный изменением термодинамических параметров пленок незамерзшей воды в результате их течения, фазовых переходов, миграции ионов и др. В зависимости от внешних условий, дисперсности, химико-минерального состава и строения пород значение каждой из выделенных составляющих общего давления в криогенном деформировании различно и, в первую очередь, определяется структурой порового пространства и фазовым составом влаги в нем. В результате проведенной систематизации типов структур показана их роль в кинетике криогенного деформирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вялов С. С.* Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 183 с.
2. *Глобус А. М.* Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена. М.: Гидрометеоиздат, 1983. 280 с.
3. *Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л.* Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 382 с.
4. *Дерягин Б. В., Чураев Н. В.* Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 160 с.
5. *Ершов Э. Д.* Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М.: Изд-во МГУ, 1979. 201 с.
6. *Ефремов И. В.* Периодические коллоидные структуры. Л.: Химия, 1971. 191 с.
7. *Зарецкий Ю. К.* Теория консолидации грунтов. М.: Наука, 1967. 270 с.
8. *Зиангиров Р. С.* Объемная деформируемость глинистых грунтов. М.: Наука, 1979. 164 с.

9. *Кульчицкий Л. И., Усьяров О. Г.* Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. М.: Недра, 1981. 178 с.
10. *Овчаренко Ф. Д.* Гидрофильность глин и глинистых минералов. Киев. Изд-во АН УССР, 1961. 291 с.
11. *Орлов В. О. и др.* Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты. Л.: Стройиздат, 1977. 181 с.
12. *Осипов В. И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 231 с.
13. *Савельев Б. А.* Физика, химия и строение природных льдов и мерзлых горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1971. 505 с.
14. *Сергеев Е. М. и др.* Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1971. 594 с.
15. *Швецов П. Ф.* Пучение пылевато-глинистых пород при промерзании в свете термодинамики необратимых процессов//Матер. VIII Всесоюз. междувед. совещ. по геокриологии (мерзлотоведению). Вып. 4. Якутск, 1966. С. 46—58.
16. *Щукин Е. Д. и др.* Физико-химическая механика природных дисперсных систем. М.: Изд-во МГУ, 1985. 264 с.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию
22.X.1985

УДК 624.131.32

КАЛИНИН Э. В., ПАНАСЬЯН Л. Л., ГАДЖИЕВ М. Г.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ПОРОД ПРИ СДВИГЕ В ПОДСТИЛАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Сдвиги земной коры вдоль глубинных разломов, которые наблюдаются, например, по разлому Сан-Андреас в Калифорнии или по Таласо-Ферганскому разлому в Тянь-Шане, неизбежно приводят к возникновению в перекрывающих их отложениях напряжений и соответствующих им деформациям [2]. Для изучения напряженно-деформированного состояния массива пород в случае сдвиговых смещений в подстилающем его фундаменте кроме геологических и геофизических исследований с успехом могут быть применены математические методы. С помощью расчетов при определенных предположениях о величинах и направлении приложенных к массиву пород сил можно исследовать и прогнозировать развитие в нем напряжений и деформаций, устанавливать область их распространения, ориентировочную величину и направление действия.

В настоящей статье приводится пример решения задачи о напряженно-деформированном состоянии верхнего слоя (осадочного чехла), залегающего на жестком основании (кристаллическом фундаменте), в котором произошло горизонтальное смещение. Предполагалось, что отложения верхнего слоя являются однородными по упругим свойствам, имеют конечную жесткость и характеризуются единичным модулем упругости E и коэффициентом Пуассона, равным 0,25. Нижним подстилающим слоем моделировался кристаллический фундамент, деформируемость которого значительно меньше, чем залегающих на нем пород, что позволило рассматривать его как недеформируемое абсолютно жесткое основание. Предполагалось также, что верхний и нижний слои жестко скреплены между собой, поэтому любые деформации в подстилающих образованиях вызывают изменение напряженно-деформированного состояния пород верхнего слоя. Такое предположение наиболее естественно, поскольку вдоль горизонтальных плоскостей в земной коре действуют значительные силы трения и сцепления. Кристаллическое основание осложнено крупным вертикальным разломом, по которому происходит перемещение в горизонтальном направлении, что имеет место при глубинных сдвигах. Оно вызывает изменение напряжений и деформацию в вышележащих отложениях, что и является предметом исследования. Анализ напряженно-деформированного состояния верхнего слоя выполняется при условии сохранения его сплошности, т. е. возникающие в нем напряжения не превышают предела прочности слагающих его пород и не приводят к разрушению.

При решении поставленной задачи для простоты интерпретации полученных данных из верхнего слоя был выделен единичный объем кубической формы. Его нижняя грань *OXY* совпадает с поверхностью раздела нижнего и верхнего слоев, которая предполагается горизонтальной. Через эту грань верхнему слою передаются деформации, происходящие в нижнем слое. Предполагалось, что на вертикальных гранях единичного куба напряжения не действуют, но это не соответствует действительности, так как через боковые грани выделенный куб соприкасается с остальным массивом, где напряжения должны существовать. При ана-

лизе полученного решения области, примыкающие к боковым граням куба, должны быть исключены из рассмотрения. Верхняя грань совпадает с поверхностью земли и свободна от напряжений.

Выделенный единичный куб представлен на рис. 1. Три его ребра совпадают с осями координат. В плоскости *OXY* параллельно оси *X* проходит разрыв *AB*, моделирующий тектонический разлом. Вдоль линии *AB* части плоскости перемещаются в противоположных направлениях на величину 0,001 длины ребра куба, что приводит к деформации всего единичного объема. При расчете единичный куб был разделен плоскостями, параллельными координатным плоскостям на элементарные кубики. Шаг между плоскостями по всем трем направлениям, совпадающим с осями координат, один и тот же и составляет 0,1 длины ребра. При делении единичного кубического объема таким образом количество узлов в расчетной области, которые совпадают с вершинами элементарных кубиков, составляет 11^3. В результате расчета для каждого узла были определены напряжения и деформации.

Решение поставленной объемной задачи осуществлялось с помощью одного из вариантов численных методов решения задачи теории упругости [1]. Полученные данные характеризуют напряженно-деформированное состояние всего единичного куба, так как перемещения, деформации и напряжения его любой точки могут быть получены путем линейной интерполяции между соседними узлами, поскольку данный единичный куб является однородным и изотропным.

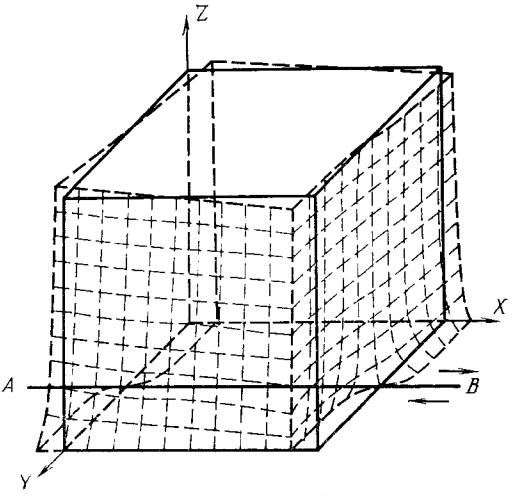


Рис. 1. Деформация кубического единичного объема в результате сдвига его основания *XOY* относительно линии *AB*. Стрелками показано направление смещения

На рис. 1 показаны перемещения узловых точек, которые произошли в результате сдвига его нижней грани вдоль средней линии *AB*, параллельной оси *X*. При таком сдвиге и при условии, что не происходит разрыва сплошности материала куба, все узловые точки основания кубического объема, лежащие на линии *AB*, остаются неподвижными. Все остальные точки нижней грани куба получают относительно неподвижной линии *AB* перемещения вдоль нее на относительную величину 0,001 длины ребра куба, но в противоположных направлениях, в зависимости от того, справа или слева от линии *AB* они находятся. Таким образом, нижняя грань куба испытывает симметричный сдвиг относительно средней линии *AB*. Аналогичные, но меньшие по величине перемещения отмечаются для расположенных выше горизонтальных плоскостей, причем величины перемещений монотонно уменьшаются при удалении от нижней грани. Вертикальная плоскость, параллельная оси *X* и разделяющая куб на две равные части, при этом остается неподвижной. Во всех горизонтальных плоскостях, кроме нижней грани, точки испытывают перемещения не только в направлении оси *X*, но также и в направлениях осей *Y* и *Z*. Это приводит к перекосу всего куба, которое выражается в том, что вертикальные сечения, параллельные плоскости сдвига, расположенные в головной части относительно направления смещения, растягиваются и наклоняются к линии сдвига, а в хвостовой части укорачиваются и отклоняются в противополож-

ную сторону. Наклон и изменение длины ребер куба происходит в случае, когда боковые грани куба свободны. В действительности же боковые грани связаны с окружающим массивом, и поэтому деформации в реальном массиве будут меньше. Наибольшие величины перемещений вдоль оси X отмечаются в нижней грани. В сечениях, расположенных выше, горизонтальные перемещения вдоль оси X быстро уменьшаются, но точки этих сечений дополнительно перемещаются в горизонтальном направлении вдоль оси Y (поперек основного смещения), что вызывает деформацию и вертикальные перемещения вдоль оси Z. Горизонтальные перемещения вдоль оси Y имеют наибольшие значения в точках, примыкающих к неподвижному вертикальному сечению, минимальные значения вертикальных перемещений вдоль оси Z наблюдаются в точках горизонтальных плоскостей, расположенных у нижней грани. Сдвиг нижней грани куба приводит к возникновению в материале куба деформаций и соответствующих им напряжений.

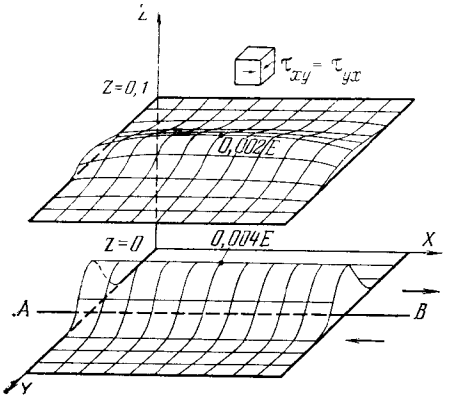


Рис. 2. Распределение касательных напряжений τ_{xy} в нижней грани XOY и в сечении $Z=0{,}1$

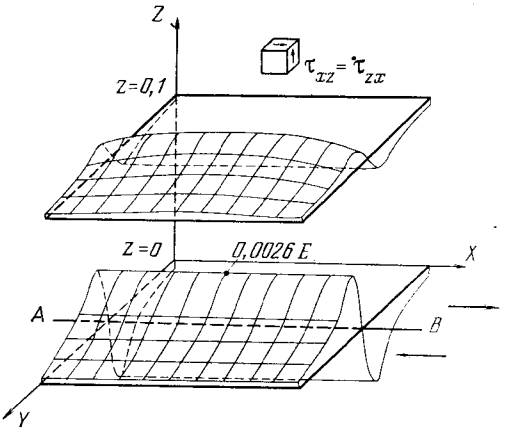


Рис. 3. Распределение касательных напряжений τ_{xz} в нижней грани XOY и в сечении $Z=0{,}1$

Все компоненты напряжений имеют максимальные значения на нижней грани и уменьшаются снизу вверх от сечения к сечению так, что к середине куба становятся практически равными нулю. Распределение нормальных напряжений в кубическом объеме является симметричным относительно вертикальной оси симметрии куба. Если куб разделить вертикальными плоскостями, параллельными координатным осям X и Y, на четыре равные части, то две части куба, расположенные по направлению сдвига, испытывают всестороннее растяжение, а две другие — всестороннее сжатие. Величины как растягивающих, так и сжимающих напряжений невелики и при удалении от нижней грани быстро уменьшаются до нуля.

Наибольший интерес вызывают касательные напряжения, которые возникают в направлении, параллельном смещению, и практически отсутствуют в направлении, перпендикулярном смещению. На рис. 2 показано распределение касательных напряжений τ_{xy}. Они действуют на вертикальных площадках, параллельных направлению движения и оси X. Эти напряжения обусловлены взаимно противоположным перемещением левой и правой частей куба по отношению к линии сдвига. Максимальных значений, составляющих 0,004 E, касательные напряжения τ_{xy} достигают на вертикальной плоскости, проходящей через линию сдвига. Влево и вправо от нее напряжения τ_{xy} быстро уменьшаются и на расстоянии 1/5 длины ребра куба становятся нулевыми. Вверх напряже-

ния τ_{xy} также становятся меньше. На расстоянии 1/5 длины ребра от нижней грани они уменьшаются в 6 раз, а на расстоянии, несколько большем половины длины ребра, обращаются в нуль.

На рис. 3 приводится эпюра распределения действующих на горизонтальных площадках тангенциальных напряжений τ_{zx}, параллельных направлению движения и оси X. Тангенциальные напряжения τ_{zx} в вертикальной плоскости, проходящей через линию сдвига, отсутствуют. На нижней грани справа и слева от линии сдвига тангенциальные напряжения имеют максимальные значения 0,00256 Е и противоположны по знаку в соответствии с направлением перемещения по отношению к неподвижной средней линии. При удалении от линии сдвига напряжения τ_{zx} уменьшаются в горизонтальном направлении до величины 0,00041 Е на боковых гранях, а в вертикальном направлении — до нулевых значений, которых они достигают в средней части куба. Вверх по оси Z максимальные значения напряжений τ_{zx} смещаются от вертикальной плоскости, проходящей через линию сдвига, в сторону боковых граней.

Выполненные расчеты показали, что при сдвиге в нижнем слое расположенный выше и жестко связанный с ним верхний слой испытывает деформацию, которая приводит к возникновению в нем напряжений. При этом нормальных растягивающих и сжимающих напряжений в верхнем слое практически не возникает, а то растяжение или сжатие, которое он испытывает, незначительно по величинам. Главным образом в верхнем слое появляются касательные напряжения, которых не было до сдвига. Как и следовало ожидать, они возникают в направлении, параллельном сдвигу, при этом напряжения на вертикальных площадках, параллельных линии сдвига, почти в 2 раза больше, чем на горизонтальных. Максимальных значений тангенциальные напряжения достигают вблизи линии сдвига. При удалении от нее напряжения быстро убывают, достигая нулевых значений на половине расстояний до боковых граней выделенного куба по горизонтали и в средней части куба в вертикальном направлении. Величина тангенциальных напряжений обусловлена величинами относительного сдвига и модуля сдвига, зависящего от модуля деформации и коэффициента Пуассона. Касательные напряжения достигают полученных при расчете величин в породах с модулем сдвига $C=E/2(1+\mu)=0{,}4$ Е при относительном сдвиге 0,001. Касательные напряжения в кубическом объеме при сдвиге в подстилающем жестком слое будут возрастать пропорционально увеличению модуля деформации и величине относительной деформации сдвига.

Расчеты были выполнены для случая, когда на выделенный кубический объем не действуют объемные силы. Под влиянием собственного веса в кубическом объеме на вертикальных и горизонтальных площадках возникнут дополнительные нормальные напряжения, величины которых могут быть оценены, исходя из плотности материала куба и его размеров. Вертикальное напряжение, действующее на горизонтальной площадке, будет равно $\sigma_y=\rho g H$, где ρ — плотность, g — ускорение свободного падения, H — фактический размер ребра куба; горизонтальное напряжение, действующее на вертикальных площадях, при коэффициенте Пауссона 0,25 будет составлять $^1/_3$ от вертикального. Полный тензор действующих в рассматриваемом кубе напряжений может быть установлен, исходя из аддитивности напряжений, путем суммирования возникающих на одноименных площадях напряжений, обусловленных сдвигом и собственным весом.

Путем сравнения напряжений, действующих в материале куба, с его прочностными характеристиками может быть установлено условие, при котором возможно разрушение верхнего слоя. Приведенные расчеты показывают, что с наибольшей вероятностью сдвиг в пределах кубического объема может произойти по вертикальным площадкам, расположенным параллельно или под углом к плоскости разреза в нижнем слое, на ко-

торых действует максимальное из определенных касательное напряжение и минимальное нормальное. Точно установить положение площадок, по которым возможен сдвиг в пределах выделенного куба, можно в том случае, когда будут известны строение, физические свойства и мощность верхнего слоя, а также будут высказаны предположения о величине смещения по разрезу в расположенном ниже основании.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Победря Б. Е., Шешенин С. В.* Некоторые задачи о равновесии упругого параллелепипеда//Изв. АН СССР. МТТ. 1981, № 1. С. 74—78.
2. *Трифонов В. Г.* Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов/Тр. ГИН. Вып. 359. М.: Наука, 1982. 113 с.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию
6.I.1986

УДК 624.131.41

КУБРИНСКИЙ Р. З.

ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРЕДЕЛАХ ТУРГАЙСКОЙ ЛОЖБИНЫ

Тургайская ложбина представляет собой отрицательную линейную структуру, вытянутую в субмеридиональном направлении. Она пересекает степную, полупустынную и пустынную ландшафтно-климатические зоны и характеризуется засушливым, резко континентальным климатом. Преобладание испарения над осадками в сочетании со слабой естественной дренированностью обусловили широкое развитие здесь процессов континентального засоления грунтов и грунтовых вод. Минерализация грунтовых вод с севера на юг закономерно нарастает от 1—15 до 40—100 г/л. В том же направлении увеличивается содержание солей в грунтах.

Четвертичные отложения, выполняющие ложбину, представляют собой продукт делювиально-пролювиального сноса с ее коренных бортов [2]. В их составе преобладают глины и суглинки, переслаивающиеся и взаимозамещающиеся в плане и по разрезу супесями и песками, пылеватыми и мелкими. Минеральный состав[1] глинистой фракции (менее 0,001 мм) глин и суглинков севера и юга ложбины существенно отличается, что, по-видимому, является отражением различного минерального состава пород областей сноса (табл. 1). Среди глинистых минералов преобладают гидрослюды и минералы группы смешанослойных типа гидрослюда-монтмориллонит; повсеместно в количествах, не превышающих 8—12%, присутствует хлорит, в отдельных образцах отмечаются монтмориллонит и смешанослойные типа хлорит-вермикулит. Содержание каолинита на южном участке варьирует в пределах 15—30%, а на севере не превышает 8—10%.

На всем протяжении ложбины глинистые грунты характеризуются значительной и неравномерной по разрезу засоленностью, высокими значениями величины набухания и быстрой размокаемостью в воде. При взаимодействии с пресной водой канала они в результате рассоления и набухания могут изменять свои физико-механические свойства. С целью определения характера и величины возможных изменений на серии монолитов было проведено комплексное изучение свойств грунтов естественного состава и состояния, а также грунтов, подвергнутых длительному диффузному выщелачиванию.

Учитывая нарастание засоленности грунтов в направлении с севера на юг, пробы отбирались на двух участках: из скважин, расположенных на севере ложбины (северный участок), и в 500 км южнее (южный участок), опробование проведено в интервале глубин 3—22 м, т. е. в зоне, на которую выщелачивание влияет в наибольшей мере. Из каждой скважины монолиты грунтов отбирались попарно, при этом длина интервала опробования составляла 0,4—0,8 м. Один монолит из каждой пары исследовался при естественном состоянии. Из второго монолита в стальных кольцах высотой 25 мм и диаметром 80 мм вырезались образцы,

[1] Минералогический анализ глинистой фракции выполнен рентгеноструктурным методом в лаборатории кафедры грунтоведения и инженерной геологии МГУ под руководством В. Г. Шлыкова.

Таблица 1

Минеральный состав глинистой фракции (<0,001 мм) четвертичных глин Тургайской ложбины

Участок	Номер скважины	Интервал отбора, м	Содержание глинистых минералов, %					
			монтмориллонит	смешанослойные (гидрослюда-монтмориллонит)	гидрослюда	смешанослойные (хлорит-вермикулит)	хлорит	каолинит
Северный	6/2	4,0—5,0		⩽15	60—65	5	10—12	8—10
		13,3—18,4	⩽10	25	45	⩽5	5—8	10
	8/1	3,0—4,0	—	40	35—40	—	8—10	8—10
		16,4—20,0	—	65	25—30	—	3—5	—
	9/1	3,0—4,0	—	45	35	—	10	10
		12,7—17,6	—	40	35—40	—	10	10
Южный	2/4	12,0	—	30	35	—	5—7	25—27
	9/7	13,0	—	10—15	55—60	⩽5	⩽10	15—17
	22/4	7,0	10	30	25—30	—	<5	⩾30

Таблица 2

Содержание легкорастворимых солей, карбонатов, гипса в четвертичных отложениях Тургайской ложбины

Участок	Номер скважины	Интервал отбора, м	Сухой остаток (по водной вытяжке)	Гипс	Карбонаты
			% от веса сухого грунта		
Северный	8т	9,0—9,5	0,269	0,10	3,09
	9т	5,5—6,0	0,109	0,65	2,54
	16т	7,5—8,0	0,235	0,67	4,90
	10/1	21,6—22,0	0,131	0,51	1,91
	11/4	13,7—14,2	0,131	0,72	3,28
	11/6	16,5—16,9	0,277	0,32	2,09
Южный	2/2	20,6—21,1	1,436	2,52	—
	2/6	16,1—16,6	1,797	0,92	2,81
	3/6	16,4—16,9	1,690	0,56	3,00
	4/5	21,5—22,0	1,690	3,44	1,67
	11т	8,5—8,9	0,234	0,47	3,36
	11/2	3,5—4,0	0,203	0,56	4,45
	17/6	6,0—6,4	1,690	0,36	1,27
	17/7	10,0—10,4	1,930	12,78	—

которые подвергались выщелачиванию в емкости с дистиллированной водой при свободном контакте грунта с водой с обеих сторон кольца. В целях предупреждения размыва и разрушения образцы в кольцах подвергались вертикальной нагрузке 0,0005 МПа. Общее время выщелачивания образцов составило 67—68 сут. Каждые сутки вода частично заменялась свежей дистиллированной. Выщелоченные в кольцах образцы подвергались всем видам лабораторных исследований, за исключением опытов по определению величины свободного набухания. Последние проводились в приборе ПНГ на грунтах естественного состояния, которые загружались в прибор и выдерживались в течение 60 сут при ежесуточной смене дистиллированной воды в приборе. Лабораторные исследования проведены в соответствии с действующими ГОСТами. Сдвиговые и компрессионные испытания выполнены в приборах системы ЦНИИС.

По степени засоления грунты северного участка существенно отличаются от грунтов южного (табл. 2). Сухой остаток по результатам водных вытяжек в целом колеблется в пределах 0,109—1,930% от веса су-

хого грунта; при этом на северном участке он изменяется от 0,109 до 0,277, на юге — от 0,203 до 1,930%. Значительны также отличия в анионном составе водных вытяжек по северному и южному участкам. В водных вытяжках грунтов северного участка преобладают гидрокарбонат- и хлор-ионы, на южном участке водные вытяжки имеют преимущественно хлоридный и сульфатно-хлоридный состав. По содержанию карбонатов участки практически не отличаются. Содержание гипса в грунтах как по визуальным, так и по лабораторным определениям заметно нарастает в южном направлении. Среднее содержание гипса на северном участке составило 0,49%, на южном — 2,70% при крайних значениях соответственно 0,10—0,72 и 0,36—12,78% (табл. 2). Следует заметить, что гипс содержится в грунтах в тонкорассеянном виде, а также в виде отдельных крупных кристаллов, друз и порошкообразных скоплений различных форм; размеры включений от долей сантиметра до 6—7, редко 10 см.

Процесс взаимодействия порового раствора засоленных глинистых грунтов и дистиллированной воды представляет собой сложный диффузионно-осмотический солеводообмен [1], в результате которого в породу поступает вода, а из породы уходят электролиты. Анализ водных вытяжек был проведен для образцов естественного состояния и после диффузного выщелачивания. В результате выщелачивания содержание водорастворимых солей во всех образцах снижается, причем уменьшение и в абсолютных, и в относительных величинах тем значительнее, чем больше начальная засоленность. Величина сухого остатка грунтов южного, более засоленного участка уменьшилась на 0,043—1,109% от веса сухой породы, или на 19—66% от его начальной величины, в то время как в грунтах северного участка эти показатели составили соответственно 0,006—0,087 и 5—37%.

Во всех образцах содержание хлор-иона уменьшилось либо сохранилось в исходном количестве. Содержание гидрокарбонат-иона в девяти случаях из 14 увеличилось, что, по-видимому, объясняется растворением карбонатов. Сульфат-ион в образцах северного участка ведет себя весьма устойчиво; на южном участке в пяти случаях содержание его резко падает, в трех случаях в той или иной мере увеличивается, что, очевидно, связано с дополнительным поступлением сульфат-иона в поровый раствор за счет растворения гипса. Изменения в катионном составе менее однозначны. Наблюдается как увеличение, так и уменьшение содержания всех трех основных катионов в выщелоченных образцах. Содержание кальций- и магний-ионов, как правило, падает и лишь в трех случаях возрастает; содержание натрий-иона в восьми образцах понизилось, в шести — возросло.

Учитывая большую неоднородность грунтов, гранулометрический и микроагрегатный анализы выполнялись для монолитов с естественным состоянием и для выщелоченных. Полученные результаты свидетельствуют о сильной агрегации глинистой фракции (менее 0,005 мм) естественных грунтов. Так, содержание глинистой фракции, по данным гранулометрического анализа, составляет 36—79%, в микроагрегатном составе пяти образцов глинистая фракция отсутствует, в девяти остальных содержится в количестве от 2 до 33%. Образцы, не содержащие частиц глинистой фракции, отобраны на южном участке и характеризуются высоким содержанием легкорастворимых солей. Характерно, что в микроагрегатном составе этих же образцов отсутствует и фракция тонкой пыли (0,01—0,005 мм).

В естественном состоянии засоленные глинистые грунты характеризуются переходным типом контактов между структурными элементами, сформировавшимися в результате сочетания структурных связей, цементационного и коагуляционного характера [3]. При взаимодействии грунтов с пресной водой в результате частичного или полного растворения

Таблица 3

Результаты исследований физико-механических свойств четвертичных глинистых грунтов Тургайской ложбины в естественном состоянии и при диффузном выщелачивании

Участок	Номер скважины, глубина отбора, м	Влажность, %	Число пластичности	Относительная влажность	Показатель консистенции	Плотность, г/см³		Коэффициент пористости	Деформация набухания, %	Модуль деформации, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
						грунта	скелета грунта					
Северный	8т	20,8	20	0,82	—0,05	2,05	1,75	0,560	1,9	12,8	0,093	19,5
	9,0—9,5	23,3	22	0,99	0,35	2,00	1,59	0,717	3,5	12,0	0,069	11,5
	9т	15,0	18	0,73	—0,05	2,02	1,75	0,560	3,7	30,6	0,127	17,0
	5,5—6,0	20,1	17	0,87	0,18	2,01	1,67	0,628	5,2	12,4	0,039	11,5
	16т	26,4	22	0,79	—0,08	1,81	1,43	0,916	0,7	11,7	0,039	22,0
	7,5—8,0	26,8	22	0,90	—0,01	1,92	1,51	0,814	7,0	9,3	0,039	11,5
	10/1	20,0	14	0,88	0,19	2,03	1,69	0,621	0,2	14,4	0,078	16,5
	21,6—22	26,9	16	0,95	0,52	1,95	1,54	0,773	0,7	9,7	0,049	6,0
	11/4	17,4	17	0,81	0,20	2,03	1,73	0,583	1,2	19,4	0,074	19,5
	13,7—14,2	26,7	18	0,91	0,70	1,92	1,52	0,803	1,3	13,5	0,088	11,5
	11/6	22,9	17	0,82	0,01	1,91	1,55	0,767	2,3	7,5	0,093	14,0
	16,5—16,9	27,0	21	0,90	0,29	1,90	1,90	0,820	7,1	7,7	0,029	11,5
Южный	2/2	23,2	27	0,93	—0,10	2,03	1,64	0,683	9,5	32,9	0,049	17,0
	20,6—21,1	30,8	30	0,90	0,19	1,86	1,42	0,937	16,6	6,6	0,025	5,5
	2/6	24,8	25	0,90	—0,04	1,96	1,57	0,758	0,2	12,3	0,127	17,0
	16,1—16,6	27,7	28	0,90	0,16	1,91	1,49	0,845	2,7	7,8	0,020	14,0
	3/6	25,2	24	0,95	—0,03	2,00	1,59	0,729	2,4	14,1	0,074	19,5
	16,4—16,9	26,9	28	0,89	0,10	1,90	1,50	0,833	2,4	9,4	0,034	8,5
	4/5	22,5	24	0,82	—0,27	1,93	1,57	0,751	3,2	34,3	0,088	21,5
	21,5—22,0	37,5	28	1,00	0,40	1,92	1,40	0,964	7,2	4,9	0,010	11,5
	11т	31,3	26	0,84	0,17	1,79	1,36	1,022	1,0	9,9	—	—
	8,5—8,9	34,2	30	0,89	0,32	1,84	1,41	0,943	4,6	6,9	0,025	14,0
	11/2	29,5	18	0,92	0,25	1,90	1,46	0,876	0,3	8,3	0,029	16,5
	3,5—4,0	31,3	20	0,92	0,56	1,87	1,42	0,929	3,4	8,2	0,034	8,5
	17,7	20,8	21	0,82	—0,25	1,97	1,63	0,693	9,6	16,6	0,088	22,0
	10,0—10,4	28,8	25	0,93	—0,15	1,92	1,49	0,846	10,0	6,5	0,007	10,0

Примечание. В числителе дроби приведены значения показателей свойств грунтов в естественном состоянии, в знаменателе—грунтов, подвергнутых диффузному выщелачиванию.

солей цементационные связи ослабляются и разрушаются. Одновременно происходят изменения в составе обменного комплекса глинистых минералов, обусловленные изменениями ионного состава и концентрации порового раствора. Это приводит к изменениям микроагрегатного состава, дополнительной гидратации и утолщению диффузных слоев, порода разуплотняется и разупрочняется.

В процессе выщелачивания глины пептизируются, происходит разрушение агрегатов песчаных и крупнопылеватой фракций. В результате содержание тонкопылеватой и глинистой фракций увеличивается. Лишь в двух образцах отмечается уменьшение суммарного содержания последних в выщелоченных грунтах, что, по-видимому, можно объяснить неоднородностью четвертичных грунтов Тургайской ложбины. В результате выщелачивания убывают значения коэффициента агрегации частиц глинистой фракции. Эти изменения наиболее резко проявляются на грунтах южного участка. По северному участку коэффициент агрегации снижается с 6,9—19,0 до 2,7—6,6, по южному с 1,5—∞ до 1,3—14,8.

Грунты естественного состояния характеризуются числом пластичности от 14 до 27. В результате диффузного выщелачивания пластические свойства грунтов несколько изменяются. Как видно из табл. 3, в подавляющем большинстве образцов число пластичности возросло на величину от 1 до 4 единиц. Увеличение числа пластичности происходит в равной степени как за счет возрастания верхнего, так и убывания нижнего пределов пластичности.

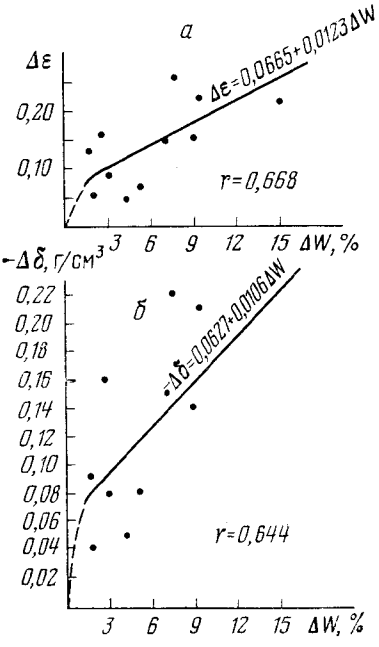


Рис. 1. Зависимости приращения коэффициента пористости $\Delta\varepsilon$ (*а*) и снижения плотности скелета грунта $\Delta\delta$ (*б*) от величины приращения влажности ΔW

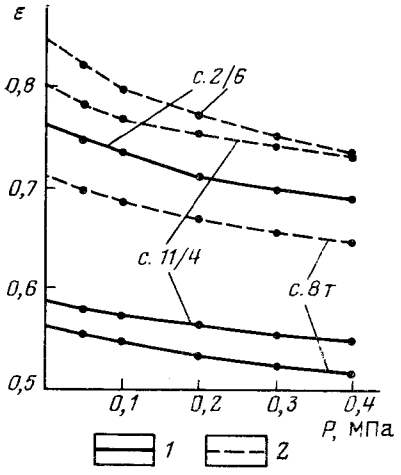


Рис. 2. Компрессионные кривые для: *1* — естественных грунтов, *2* — выщелоченных грунтов

Влажность исследованных образцов в результате выщелачивания и дополнительной гидратации увеличилась на 0,4—15,0%. Значительно увеличился показатель консистенции; грунты твердой и полутвердой консистенции перешли в полутвердые, туго- и мягкопластичные. В большинстве образцов резко возрос коэффициент пористости, заметно снизилась плотность грунтов и плотность скелета (табл. 3). Отмеченное в двух случаях уплотнение грунтов, по-видимому, следует отнести на счет неоднородности и резкой изменчивости свойств естественных грунтов, в результате чего исходные показатели двух соседних монолитов оказываются несопоставимыми. Между изменениями влажности и плотности скелета грунта, влажности и коэффициента пористости обнаруживается достаточно тесная зависимость (рис. 1).

Дополнительное набухание исследованных грунтов за счет диффузного выщелачивания отмечалось в 12 образцах и составило 0,4—7,1%, в одном образце приращение объемного набухания не наблюдалось. Какой-либо зависимости величины дополнительного набухания от показателей состава и свойств грунтов и их изменений в результате выщелачивания не обнаружено. Это, вероятно, объясняется незначительным объемом экспериментального материала и сложностью связей между показателями.

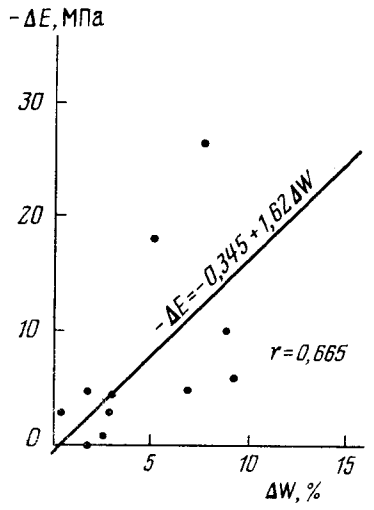


Рис. 3

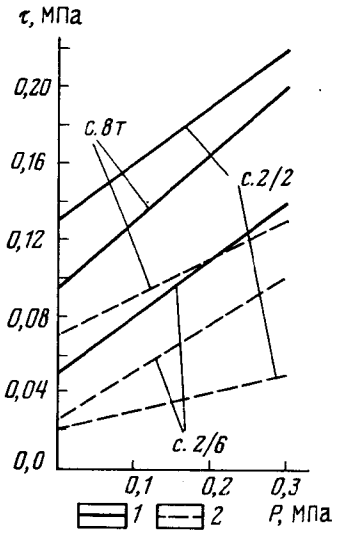


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость величины снижения модуля деформации ΔE от приращения влажности ΔW

Рис. 4. Графики зависимости сопротивления сдвигу τ от нормального давления P для: *1* — естественных грунтов; *2* — выщелоченных грунтов

Сжимаемость грунтов в результате разуплотнения и дополнительной гидратации увеличилась в среднем в 2 раза, что хорошо видно при сравнении обобщенных компрессионных кривых естественных и выщелоченных грунтов (рис. 2). Модуль деформации в 11 образцах понизился на 0,8—29,4 МПа, в двух образцах практически не изменился. Рассмотрение парных зависимостей величины снижения модуля деформации от изменения концентрации основных анионов и катионов, общего снижения величины сухого остатка, а также приращения влажности, консистенции и коэффициента пористости показало, что с определенностью можно говорить лишь о наличии связей между снижением модуля деформации и приращением влажности (рис. 3). Этот факт не отрицает закономерного изменения модуля деформации в зависимости от поведения других характеристик грунтов и показателей их солевого состава, однако закономерности эти, по-видимому, более сложные и не столь очевидные.

Особенно резко в результате опытов изменились сдвиговые характеристики грунтов (рис. 4). Угол внутреннего трения, составляющий в естественных условиях 14—22°, упал до 5,5—14°, сцепление грунтов снизилось с 0,029—0,127 до 0,007—0,088 МПа, а сопротивление сдвигу (при вертикальной нагрузке 0,3 МПа) — с 0,12—0,22 до 0,05—0,15 МПа. Изменения сопротивления сдвигу наиболее тесно связаны с изменениями влажности и пористости (рис. 5, 6). Сцепление, имея общую тенденцию к снижению, не обнаруживает сколько-нибудь тесной связи ни с одним из рассмотренных показателей, характеризующих состав и свойства грунтов.

Следует особо подчеркнуть, что существенное ухудшение показателей прочностных и деформационных свойств наблюдается как для сильно засоленных грунтов, подвергшихся значительному рассолению, так и для слабо засоленных, вынос солей из которых в результате выщелачивания по абсолютным значениям оказался весьма незначительным.

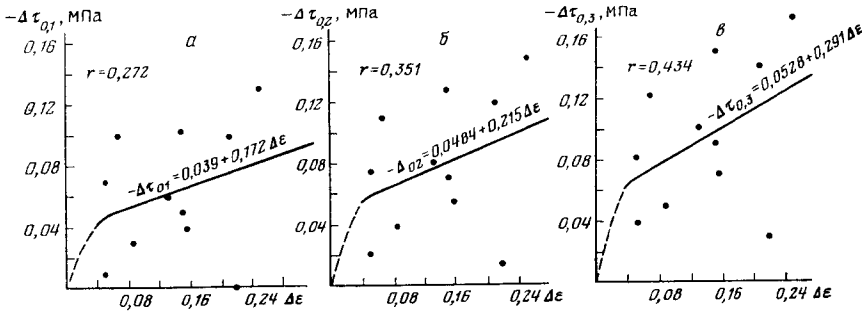


Рис. 5. Зависимость величины снижения сопротивления сдвигу $\Delta\tau$ от приращения коэффициента пористости $\Delta\varepsilon$ при нормальном давлении, МПа: *а* — 0,1, *б* — 0,2, *в* — 0,3

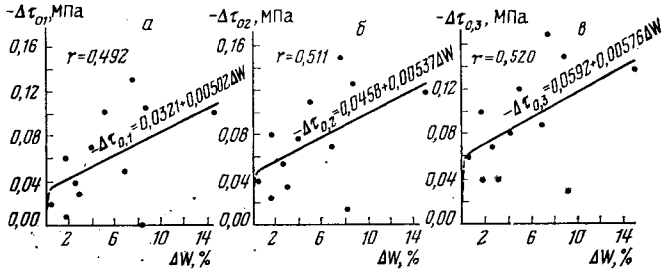


Рис. 6. Зависимость величины снижения сопротивления сдвигу $\Delta\tau$ от приращения влажности ΔW при нормальном давлении, МПа: *а* — 0,1, *б* — 0,2, *в* — 0,3

Наиболее резкое ухудшение показателей свойств грунтов произошло на южном участке, характеризующемся повышенной засоленностью.

Таким образом, установлено, что в результате взаимодействия исследованных глинистых грунтов с дистиллированной водой активно протекают процессы диффузионно-осмотического солеводообмена, сопровождающиеся изменениями микроагрегатного состава, влажности, пористости и пластических свойств. Следствием этих изменений является резкое ухудшение показателей деформационных и прочностных свойств грунтов. Изменения состава и свойств грунтов, в том числе и прочностных будет происходить повсеместно, независимо от степени их засоления. Выбор расчетных характеристик при проектировании должен опираться на обоснованный прогноз изменения свойств грунтов. В то же время недостаточная изученность вопроса не позволяет осуществлять прогноз расчетным путем или экстраполировать результаты моделирования процессов выщелачивания на большие расстояния, различные виды грунтов и т. д. Это требует постановки специальных работ на этапе исследований при разработке проекта непосредственно в зонах проектируемых инженерных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Затенацкая Н. П., Панкратова И. А., Басинская Е. В.* Изменение прочностных свойств засоленных глин при их диффузном выщелачивании.//Инж. геология. 1981. № 5. С. 48—64.
2. *Кубринский Р. З.* Закономерности пространственного изменения состава четвертичных отложений Тургайской ложбины.//Инж. геология. 1984. № 1. С. 72—78.
3. *Осипов В. И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.

ПГО Гидроспецгеология

Поступила в редакцию
11.V.1985

УДК 624.131.536

ГАЙДИН А. М.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ВОДОПОНИЖЕНИЯ

Интенсификация карстово-суффозионных процессов в районах развития депрессионных воронок вокруг водозаборов и систем осушения — явление весьма распространенное. Так, на одном серном месторождении число ежегодно образующихся воронок возросло более чем в 10 раз по сравнению с естественными условиями [2]. Возникли вопросы: сохранится ли такая интенсивность до конца эксплуатации месторождения? Захватят ли провалы новые площади? Насколько реальна угроза для промышленных и гражданских сооружений, находящихся в зоне депрессионной воронки?

Для ответа на эти вопросы на месторождении многие годы ведутся обширные комплексные исследования с использованием различных методических подходов.

В работе [5] предпринята попытка по результатам гидрохимического опробования рассчитать агрессивность подземных вод по отношению к гипсоангидритам с тем, чтобы установить скорость карстообразования. Были построены карты гидрохимических показателей, характеризующих равновесие систем гипс — вода и кальцит — вода. В результате исследований выявлено, что нарушение гидрохимического равновесия произошло практически по всей площади депрессионной воронки. Поэтому какие-либо конкретные прогнозы оказались затруднительны.

В работе [2] для прогнозирования карста использовался метод апостериорных вероятностей с использованием известной формулы Байеса. Суть метода базируется на предположении о том, что если некоторый участок характеризуется такой же совокупностью признаков, какая наблюдалась в районе уже произошедшего провала, то указанный участок также имеет шансы провалиться.

Данный метод, базируясь на прошлом опыте, не учитывает главного фактора — изменения в будущем напора подземных вод. Поэтому с помощью метода апостериорных вероятностей можно оконтурить только участки, карстоопасные при уже достигнутом положении депрессионной воронки, т. е. дать прогноз на сегодня, а не на будущее.

В связи с этим более перспективен методический подход, основанный на представлениях о влиянии воды на напряженное состояние горных пород [1, 3]. Этот подход развивается в работах В. М. Кутепова [3], В. П. Хоменко [6], Н. Н. Ярцевой [7].

Для понимания механизма образования провалов большое значение имеет работа В. П. Хоменко. Им экспериментально доказана определяющая роль изменения напора подземных вод и предложена эмпирическая формула для определения площади поперечного сечения карстового колодца, при достижении которой произойдет обрушение потолочины и образование воронки на поверхности.

Развивая этот подход, автор предложил [4] уточненное уравнение равновесия потолочины (рис. 1):

$$\bar{\delta}_{\text{п}}(1-n)\frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{г}}}+n\frac{h}{m_{\text{г}}}-\frac{H}{m_{\text{г}}}\leqslant\frac{2[\tau]}{rg\delta_{\text{в}}}-\bar{\gamma}_{\text{г}},$$

где $\bar{\delta}_п$ — относительная плотность частиц песка, n — пористость, $m_п$ — мощность, $m_г$ — мощность водоупорного слоя глины, h — мощность водоносного горизонта в песках, H — напор карстового водоносного горизонта над кровлей карстующихся пород, τ — сопротивление глин срезающему усилию, r — радиус «колодца» в гипсах, $\delta_в$ — плотность воды, $\gamma_г$ — относительная плотность глин в естественном залегании.

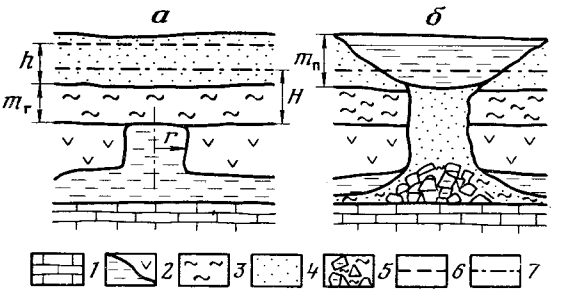


Рис. 1. Схема к расчету устойчивости потолочины над карстовым колодцем: *а* — разрез до провала, *б* — после провала. *1* — известняк, *2* — гипсоангидрит и карстовая полость, *3* — глина, *4* — песок, *5* — разрушенные глины, *6* — уровень грунтовых вод, *7* — напор карстового водоносного горизонта

Первый член уравнения показывает, что провалы поверхности произойдут прежде всего там, где мощность глин минимальна ($m_г \to 0$), а мощность песков максимальна. И действительно, 80% всех воронок в районе месторождения сосредоточены в долинах рек, где косовские глины размыты и перекрыты аллювиальными отложениями. Второй член уравнения указывает на опасность, создаваемую поднятием уровня грунтовых вод, в частности, при заполнении водохранилищ. И в самом деле, интенсивность провалообразования достигла апогея после затопления водохранилища, устроенного в долине реки; в конечном счете пришлось спустить из него воду и построить выше другую плотину. Третий член уравнения характеризует влияние понижения уровня воды карстового водоносного горизонта. О ведущей роли этого фактора мы уже говорили в начале статьи. Безразмерный комплекс, находящийся в правой части уравнения, указывает на то, что провал может случиться, если в гипсовой толще имеются карстовые пустоты с площадью обнажения кровли, характеризуемой радиусом r.

Так как при сегодняшнем уровне развития геофизических методов обнаружить и выявить геометрические параметры пустот не представляется возможным, приходится предположить, что морфологические особенности системы карстовых пустот, характеризуемые показателем r, являются статистически однородными. Вероятной считается возможность существования карстовых колодцев на любом участке в пределах данного пещеровмещающего блока.

В условиях серных месторождений основанием для такого допущения могут служить спелеологические данные по пещерам-аналогам, выведенным в результате искусственного осушения (или естественно-исторических процессов) в зону аэрации.

На рис. 2 показан пример плана гипсовой пещеры Волыно-Подольской карстовой области. Пещеры принадлежат той же геологической формации, что и карстовые системы серных месторождений, что позволяет сделать допущение об аналогии основных морфологических характеристик [4]. Наиболее существенной чертой этих пещер является равномерное решетчатое строение, наследующее структуру тектонической трещиноватости, причем на пересечении горизонтальных ходов образуются вертикальные камины и колодцы, часто достигающие покрывающих пород [4]. Сеть ходов весьма густая, расстояние между ними порядка 5—25 м, то есть вероятность наличия подземных пустот очень высока. Считая правую часть уравнения постоянной, по крайней мере в пределах рассматриваемой системы, можно использовать метод ана-

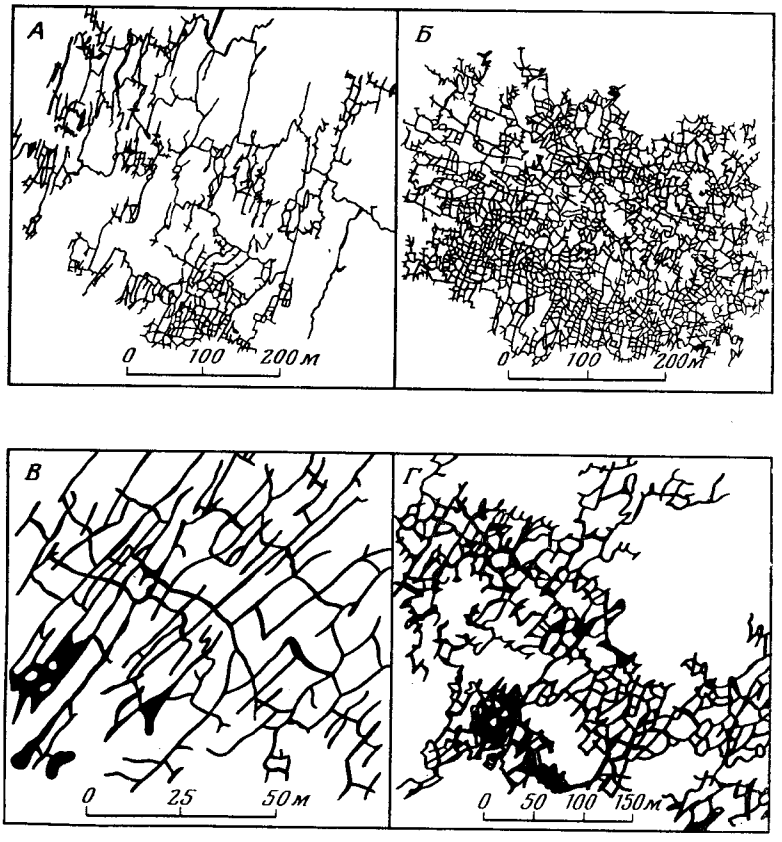


Рис. 2. Характерные планы пещерных систем в гипсоангидритах Волыно-Подолии (рис. А. Б. Климчука). А, Б — различные фрагменты пещеры Оптимистической, В — Кристальная, Г — Золушка

логии. Для этого необходимо выяснить геологическое строение и рассчитать положение напоров воды на прогнозируемом участке и на ближайшем участке, где произошел провал.

Провал на прогнозируемом участке произойдет при условии:

$$K_o \geqslant K_м; \quad K = \bar{\delta}_п (1 - n) \frac{m_п}{m_г} + n \frac{h}{m_г} - \frac{H}{m_г},$$

где индексы о и м означают соответственно объект и модель.

Например, на участке-модели, где произошел провал, $\bar{\delta}_п = 2{,}7$; $n = 0{,}3$; $m_п = 9{,}8$ м, $m_г = 2$ м, $h = 3$ м, $H = 12$ м. Требуется оценить возможность провала на участке-объекте, где $m_п = 12$ м, $m_г = 3$ м, $h = 12$ м, и остальные параметры те же, что на участке-модели, при условии, что уровень воды карстового горизонта понизится на 10 м, т. е. будет равняться 2 м. Подставив параметры в уравнение, получим для «модели» значение суммы критериев, равное 3,7, а для объекта — 8,2, т. е. провал может произойти.

Чтобы составить прогноз карстовой опасности с помощью предложенного способа, необходимо иметь карты изомощностей песков и глинистой толщи, а также рассчитать положение уровней грунтовых и напорных вод на соответствующие моменты времени.

Для расчета уровней и напоров рекомендуется применение сеточных электромоделей, позволяющих учитывать характерную для карстово-трещинных водоносных горизонтов неоднородность, а также взаимодействие с поверхностными и грунтовыми водами.

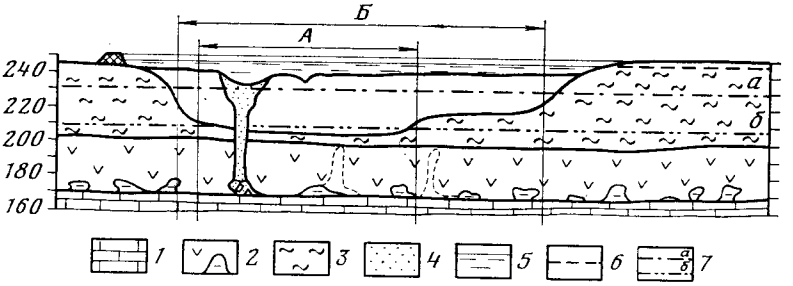


Рис. 3. Схематический разрез района серного месторождения. А — провало-опасная зона при фактическом положении уровня, Б — то же при прогнозируемом уровне (210 м). *1* — известняк, *2* — гипсоангидрит и карстовые полости, *3* — глина, *4* — песок, *5* — вода, *6* — уровень грунтовых вод, *7* — напоры карстового горизонта; *а* — фактический, *б* — прогнозируемый

В целях проверки «работоспособности» предложенного метода нами проведены предварительные прогнозные расчеты карстовой опасности для серного месторождения, разрез которого схематически изображен на рис. 3.

Расчеты показали, что развитие карьера приведет к существенному понижению уровней к югу от месторождения, тогда как к востоку депрессионная воронка практически не изменится из-за обильной инфлюации поверхностных вод. Соответственно в южном направлении вдоль правого борта долины реки будут происходить новые провалы поверхности, карстовое поле будет постоянно расширяться до окончания эксплуатации карьера. Что касается восточной части территории, то здесь будет преобладать расширение уже существующих воронок за счет механической и химической суффозии.

Таким образом, в предлагаемом методе прогнозирования удалось увязать аналого-аналитический, геомеханический и гидрогеологический подходы, что должно обеспечить повышение достоверности и точности прогнозов карстопровальной опасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аренс В. Ж., Гайдин А. М.* Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических способов добычи полезных ископаемых. М.: Недра, 1978 с.
2. *Блоцкий Н. А.* Геологическое прогнозирование техногенного карстообразования в зонах разработки серных месторождений Предкарпатья: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь, 1982.
3. *Кутепов В. М.* Формирование напряженного состояния массивов горных пород на закарстованных территориях//Инж. геология. 1983. № 1. С. 67—80.
4. Охрана геологической среды на серных месторождениях/Сост. А. М. Гайдин. Обзор. инф. Сер. Сера и серная пром-сть. М.: НИИТЭХИМ, 1985. 35 с.
5. *Федорова Т. К.* Изменения химического состава и агрессивности подземных вод в связи с разработкой месторождений серы. Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов//Матер. I Всесоюз. гидрогеологической конф. Т. 2. М.: Наука, 1982. С. 331—335.
6. *Хоменко В. П.* Исследование карстово-суффозионных процессов с целью прогноза развития их поверхностных проявлений. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ПНИИИС, 1981.
7. *Ярцева Е. Н.* Причины интенсификации карстово-суффозионных явлений//Разведка и охрана недр. 1984. № 11. С. 49—54.

ВНИПИсера

Поступила в редакцию
8.IV.1986

УДК 624.131.543

КЮНТЦЕЛЬ В. В., ПАРЕЦКАЯ М. Н., ПЕТРЕНКО С. И.

КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ В г. МОСКВЕ В СВЯЗИ С ЗАДАЧАМИ ИХ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ

В пределах г. Москвы детальное изучение и прогнозирование оползней ведется в течение нескольких десятилетий. На основании проводимых исследований систематически выдаются рекомендации по рациональному освоению оползневых склонов, проведению строительных работ, обоснованию необходимого комплекса противооползневых мероприятий. Тем самым была предотвращена реальная возможность катастрофического развития оползневого процесса на Ленинских горах и во многих других частях городской территории. Однако имелись отдельные случаи, когда недоучет особенностей оползневого процесса проектными и строительными организациями приводил к деформациям возводимых на склонах зданий и сооружений. Возрастающая техногенная нагрузка, неизбежная в условиях большого города, также требует тщательной оценки ее влияния на оползни и периодической корректировки осуществляемых мероприятий инженерной защиты. Поэтому было бы непростительной ошибкой считать, что для Москвы оползневая проблема уже потеряла свою прежнюю остроту и актуальность.

В настоящее время на территории Москвы выявлено 15 крупных участков развития глубоких (глубиной до 100 м) и около 200 поверхностных оползней. Глубокие оползни поражают 25% протяженности склонов долины р. Москвы, поверхностные — 14% протяженности склонов речек и бортов оврагов.

Местоположение участков развития глубоких оползней показано на рис. 1. Поверхностные оползни в наибольшей (коэффициент линейной пораженности склонов более 0,2) и средней (0,01—0,2) степени поражают надоползневые уступы глубоких оползней на участках Ленинские горы, Фили — Кунцево, Коломенское, неукрепленные набережными берега р. Москвы, а также склоны долин рек Сетуни, Очаковки, Раменки, Городни, Чертановки. В пределах этих участков и вблизи них располагаются важные в народнохозяйственном отношении объекты — крупные коммуникации, жилые и промышленные здания, мосты, спортивные сооружения, памятники архитектуры.

Систематические стационарные наблюдения за оползнями на территории Москвы ведутся с 1955 г. после создания в 1954 г. Московской оползневой станции (ныне Московская инженерно-реологическая режимная партия Центральной инженерно-геологической и гидрогеологической экспедиции ПГО «Центргеология»). Основанием для постановки работ послужила просьба Мосгорисполкома оценить состояние намеченных к освоению оползневых участков: Ленинские горы, Фили — Кунцево, Коломенское.

С середины 70-х годов стационарными наблюдениями были охвачены все участки развития глубоких оползней. В настоящее время наблюдения ведутся по 1500 пунктам — реперам, маркам, скважинам и т. п. и включают широкий комплекс работ визуальными, высокоточными геодезическими, упрощенными инструментальными методами за оползнепро-

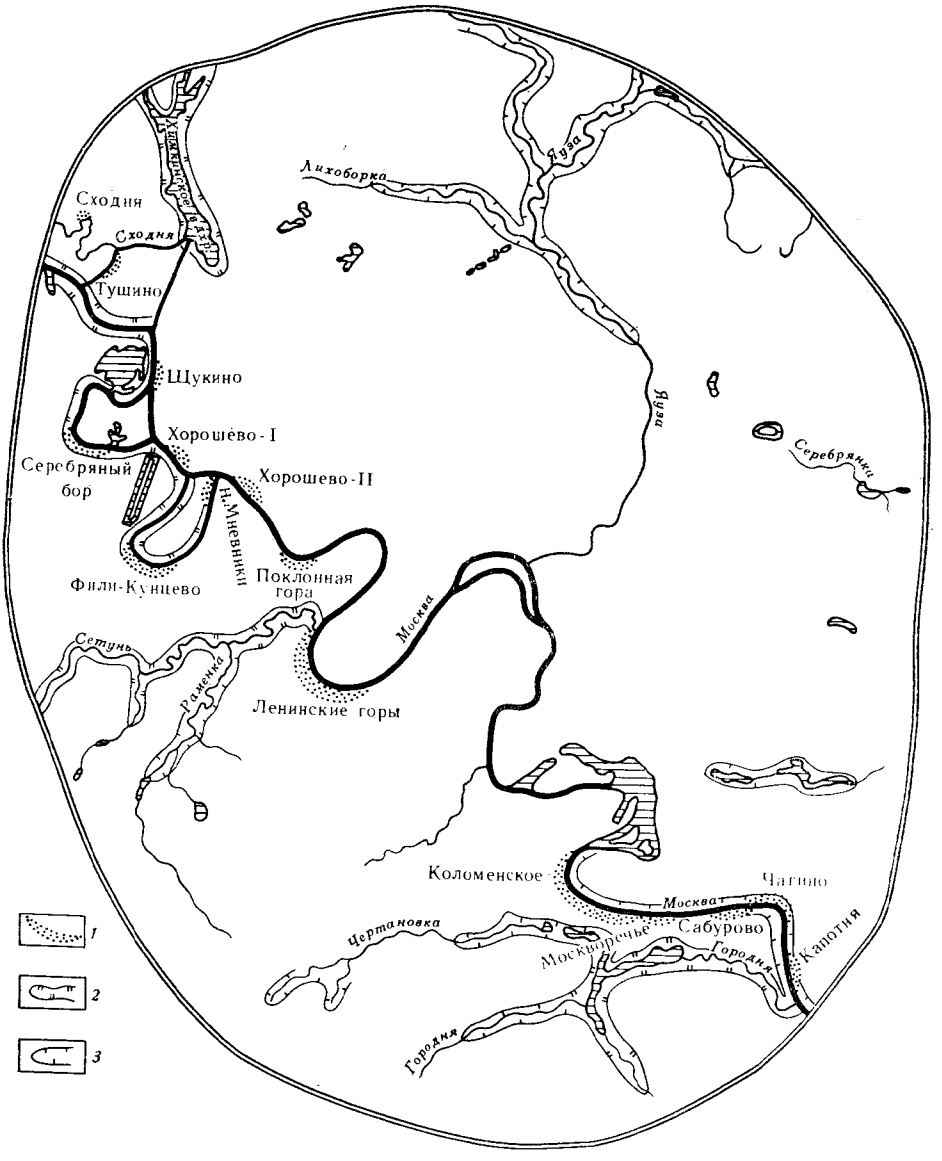


Рис. 1. Пораженность территории г. Москвы оползнями: *1* — участки развития глубоких оползней; *2* — участки, в сильной степени пораженные поверхностными оползнями; *3* — участки, в средней степени пораженные поверхностными оползнями

явлениями и факторами, их вызывающими. Привлекаются также геофизические методы (ВЭЗ, электрозондирование, радон-тороновый, ЕИЭМПЗ) для изучения строения склонов и динамики оползней, геоботанические методы — для определения возраста оползней, инженерно-геологические лабораторные — для изучения прочностных и реологических свойств пород, методы моделирования эквивалентными материалами — для изучения механизма оползней и др. Систематически, раз в пять лет, обследуется вся территория Москвы с целью оценки ее оползневой пораженности.

В течение прошедшего периода все результаты стационарных наблюдений передавались в адрес Технического управления Мосгорисполкома в виде ежегодных информационных заключений о состоянии оползневых

склонов в г. Москве и по запросам городских организаций в форме инженерно-геологических заключений о развитии оползней на отдельных участках. Всего было составлено свыше 1500 заключений по запросам более 400 организаций.

Проведенными исследованиями установлено, что на территории Москвы развиты два типа оползней, отличных по характеру механизма, а также выявлены основные закономерности их распространения и развития, позволяющие оценить их современное состояние и осуществлять прогноз.

Оползни, относящиеся по своему механизму к типу оползней выдавливания (раздавливания, сдвига), имеют значительные размеры, четко выраженную блоковую структуру и фронтальную, реже циркообразную, форму в плане. Протяженность оползней вдоль склона достигает 3 км, а их длина по оси смещения — 120—350 м. Максимальная глубина захвата пород оползнем достигает 100 м, в среднем 40—50 м. Основным деформирующимся горизонтом (ОДГ) являются глины оксфордского яруса юрской системы, склонные к деформациям ползучести и снижению прочности во времени даже при небольших напряжениях [2].

До стационарных наблюдений считалось, что эти оползни древние и полностью стабилизировались. Теперь же установлено, что они имеют современный возраст и многие из них находятся в стадии подготовки основного смещения, средняя продолжительность которой составляет несколько сот лет. Скорости смещений в стадию подготовки обычно не превышают 5—10 см в год, в отдельные годы достигают 25—30 см. При невысоких скоростях смещений и отсутствии оползневых трещин легко создается иллюзия неподвижности склонов. Однако при возрастании воздействия тех или иных факторов скорости деформаций могут заметно увеличиться, вплоть до критических.

До укрепления склонов основным фактором интенсивного развития оползней этого типа являлась речная, реже овражная эрозия. В настоящее время на закрепленных участках главным дестабилизирующим фактором становится техногенная нагрузка, проявляющаяся в самых разнообразных формах.

Поверхностные оползни по своему механизму в основном относятся к типу оползней течения, иногда в комбинации со скольжением. Как правило, они вторичные (т. е. развиваются на фоне глубоких оползней), имеют небольшие размеры и неправильную в плане форму. Многие из них относятся к оплывинам с глубиной захвата до 0,5—1 м. Основными факторами, их обусловливающими, помимо подсечки склонов водотоками или искусственными выемками является увлажнение пород атмосферными осадками, снеготаянием или искусственным путем (в результате утечек из водопроводной и канализационной сети, поливов и т. д.). По данным стационарных наблюдений, выявлена повторяемость их массовой активизации со средней продолжительностью 9 лет, которая по реперным датам хорошо коррелируется с одним из ведущих внутривековых оползневых ритмов порядка 10 лет [1]. Установлено также, что высокая активность этих оползней отмечалась в течение двух лет после начала активизации (1966—1967, 1975—1976 и 1984—1985 гг.). Оползнеопасным периодом для них является апрель—май, реже они возникают в осенний период. В последние годы заметно возросло влияние на оползни данного типа техногенных факторов за счет производства подрезок, подсыпок, ухудшения гидрогеологических условий, размыва и обводнения из неисправной водосточной и дренажной сети, неурегулированного сброса хозяйственных вод и т. д. В то же время ликвидация части оврагов и укрепление склонов сокращает площади распространения поверхностных оползней.

В настоящее время глубокие оползни находятся в стадии подготовки основного смещения на пяти участках (Щукино, Серебряный бор, Хоро-

шево-1, Нижние Мневники, Москворечье). Скорости их движения составляют 1—4 см/год. На четырех участках (Сходня, Сабурово, Чагино, Капотня) к оползневым склонам прислонены пойменные террасы, что обусловливает их стабильное состояние.

На шести оползневых участках к настоящему времени выполнены противооползневые мероприятия, состав которых был разработан институтами «Фундаментпроект» и «Мосинжпроект». К ним относятся: уположение склонов посредством выноса линии регулирования в реку, пригрузка нижней части склона насыпным банкетом между старой и новой линиями регулирования, сооружение стенки набережной на свайном основании (глубиной 9—11 м) для прекращения бокового подмыва склона и наброска перед ней в русло реки каменного материала для предотвращения донной эрозии, дренирование склона, водоотвод, благоустройство территории с заделкой оползневых трещин. Участки в основном используются лишь в качестве парковых территорий и не подвергаются интенсивному освоению.

На большинстве участков отмечается долгосрочная эффективность выполненных мероприятий [3], что подтверждается высокоточными геодезическими наблюдениями. Однако на одном из них на протяжении примерно 600 м происходит активизация глубоких оползней, смещающихся со скоростями 0,004—0,010 м/год в сторону реки (рис. 2). Очаг деформаций, зародившихся в 1962 г., приурочен к головной части оползня. В последующие годы деформации распространились вверх и вниз по течению реки и вниз по склону и местами вовлекли в смещение стенку набережной, некоторое время удерживавшую склон.

Основными причинами активизации оползня являются пригрузка его головной части и, возможно, разгрузка языковой. Пригрузка образовалась за счет смещения поверхностных оползней с верхней неукрепленной части склона, а также отсыпок грунтов при ремонте расположенной здесь лестницы, систематически разрушаемой оползневыми подвижками. Кроме того, пригрузка головы оползня увеличилась за счет подъема уровня грунтовых вод до 2,6 м. Разгрузка языковой части оползня могла произойти вследствие донной эрозии, искусственно интенсифицированной периодическими залповыми пропусками воды в р. Москве, производившимися для прочистки русла. Нарушению устойчивости склона содействовало также ухудшение состояния ряда элементов системы противооползневой защиты, в частности засорение дренажной сети. В настоящее время деформации наблюдаются в том месте, где до производства противооползневых мероприятий они были наибольшими, а склон не был достаточно выположен во избежание ухудшения условий судоходства.

Еще более негативные воздействия на склоны, пораженные глубокими оползнями, оказывают возведение в их пределах сооружений, и прокладывание коммуникаций. На одном из оползневых склонов в 60-х годах были проложены две трассы подземных коммуникаций, пересекшие склон от плато до реки. До строительства скорости глубоких деформаций составляли 2—3 см/год, трещины на поверхности склона отсутствовали. После сооружения первой трассы отмечалось некоторое увеличение скоростей деформирования, хотя были произведены лишь незначительные земляные работы с минимальным изменением баланса масс на склоне. Проложение второй трассы, сопровождавшееся вскрытием юрских глин и значительными срезками грунтов в средней части склона, вызвало значительное возрастание скоростей деформирования, не уменьшившееся даже после выполнения основных противооползневых мероприятий (уположения склона, строительства стенки набережной), стабилизировавших оползни на соседних участках. Стенка набережной протяженностью около 400 м оказывала сдерживающее воздействие, в результате скорости движения марок, установленных на ней, снизились

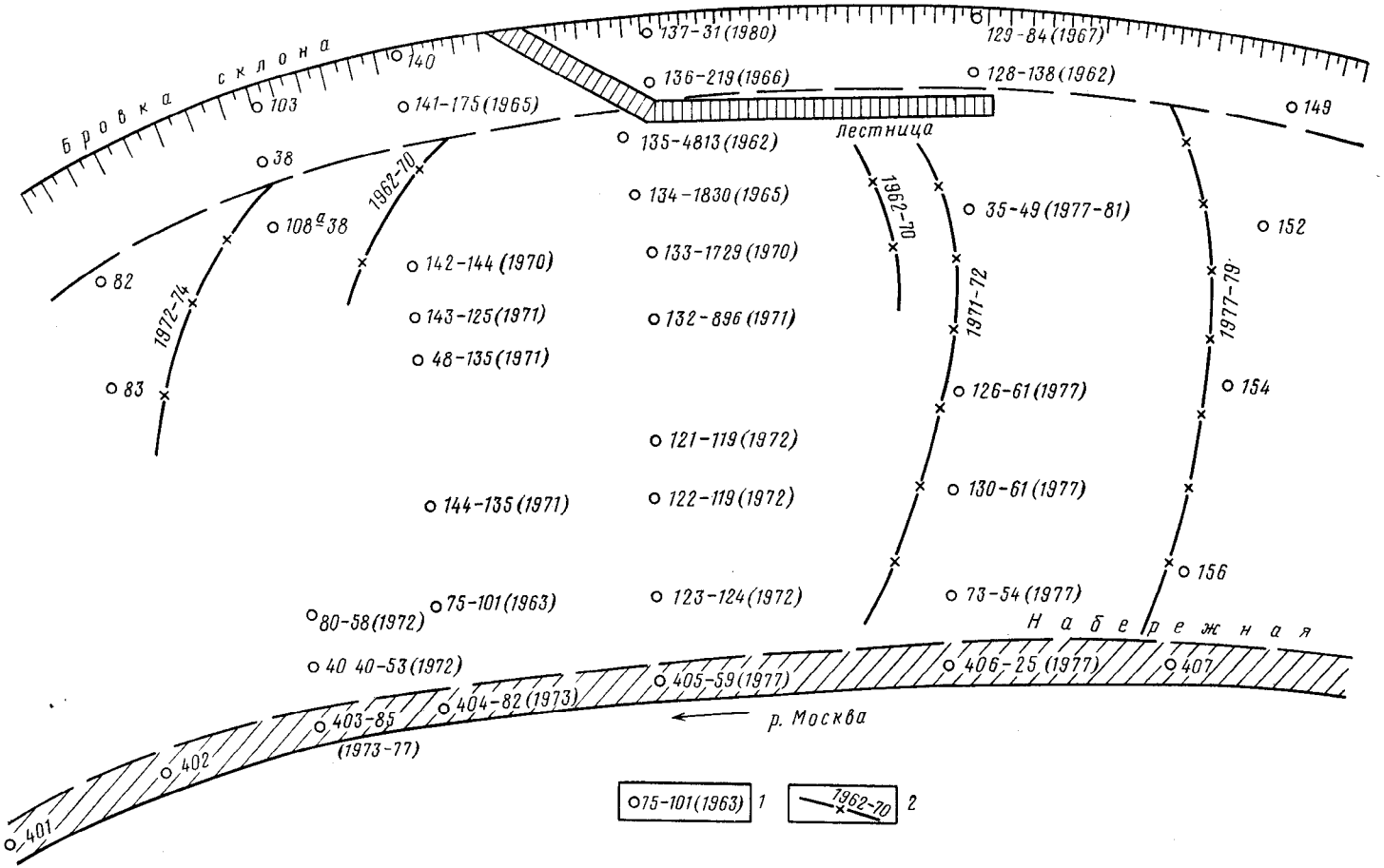


Рис. 2. Схема расположения реперов и марок на склоне: *1* — топогеодезические реперы и марки, установленные на склоне и в стенке набережной; цифры справа — номер репера (марки), величина горизонтального смещения в сторону реки в мм, в скобках год начала смещения; *2* — границы и года активизации глубоких оползней

по сравнению со скоростями реперов, расположенных на склоне. Однако впоследствии набережная сместилась вместе со всем оползневым блоком протяженностью около 500 м, оконтуренным трещинами, появившимися на поверхности склона. Величина смещения в плане на набережной против центральной части оползневого амфитеатра составила около 1,5 м, в краевой части — 0,85 м. Деформаций конструкций набережной визуально не отмечалось.

Стабилизация деформаций склона и сооружений была достигнута дополнительными мероприятиями — пригрузкой языка оползня упорной призмой длиной 400 и шириной 30 м, отсыпанной в русле реки перед набережной, засыпкой переуглублений в русле реки, а также благоустройством склона. Для обеспечения долгосрочной эффективности принятых мер необходимо систематическое наблюдение за рельефом русла в суженной части реки, где, по-видимому, возрастает донная эрозия и могут возникнуть переуглубления, вызывающие активизацию глубоких оползней. Такие участки подлежат систематической засыпке.

Приведенные результаты стационарных наблюдений за развитием оползней позволяют высказать следующие практические рекомендации: 1) склоны, пораженные оползнями выдавливания, а также присклоновые части плато целесообразно использовать в качестве парковых территорий, исключив из их пределов строительство капитальных сооружений и коммуникаций; 2) на склонах с активным проявлением оползней до развития значительных подвижек следует произвести берегоукрепительные и противооползневые мероприятия для придания определенного запаса устойчивости с учетом возрастания техногенной нагрузки; 3) исключить, по возможности, из застройки участки развития поверхностных оползней, а в случаях чрезвычайной необходимости их освоения глубоко прорабатывать меры по обеспечению их устойчивости и заблаговременно их осуществлять; 4) необходимо создать комплексный проект противооползневых и благоустроительных работ по долинам малых рек: Сходни, Сетуни, Раменки, Очаковки, Городни, Чертановки; 5) нельзя допускать ухудшения состояния склонов в ходе производства берегоукрепительных и противооползневых работ, обеспечивая действенный и тщательный авторский надзор; 6) следует усилить изучение и количественно оценить техногенные воздействия на оползневой процесс; 7) необходимо дальнейшее развитие наблюдательной сети с целью усовершенствования изучения режима оползневых процессов как важнейшего компонента общей системы литомониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кюнтцель В. В.* Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР. М.: Недра, 1980. 213 с.
2. *Парецкая М. Н.* Ползучесть и длительная прочность юрских глинистых пород Подмосковья.//ВСЕГИНГЕО. Вып. 35. М., 1971. С. 38—45.
3. *Пустыльник С. И., Парецкая М. Н.* Оценка состояния оползневых склонов и эффективности противооползневых мероприятий по результатам стационарных наблюдений//Инженерно-геологические проблемы градостроительства. М.: Изд-во МГУ, 1971. С. 93—95.

ВСЕГИНГЕО
ПГО «Центргеология»

Поступила в редакцию
4.IV.1986

УДК 624.131

ЖИГАЛИН А. Д., ЛОКШИН Г. П.

ТЕХНОГЕННОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Рациональное использование и охрана геологической среды урбанизированных территорий предопределяет необходимость изучения техногенного физического воздействия. Один из основных видов воздействия — поле вибрации является важным фактором формирования инженерно-геологической обстановки, под которой следует понимать совокупность устойчивости рельефа, механической устойчивости грунтовых массивов, служащих основанием или вмещающей средой инженерных сооружений, а также коррозионных условий [5].

Физические явления, происходящие в грунте при действии вибрации, могут приводить к уменьшению сил трения и сцепления, удерживающих его частицы в первоначальном состоянии равновесия. В зависимости от типа грунтов может наблюдаться их уплотнение, снижение сопротивления сдвигу, а в отдельных случаях разрушение структурных связей [1, 7, 8, 11, 14]. В результате этого уменьшается сопротивление всего массива внешним нагрузкам, могут возникнуть или активизироваться неблагоприятные процессы.

Подрезка склонов, придание им определенного профиля, выемка большого количества грунта и перенесение его в другое место при строительстве изменяют напряженное состояние склонов и тем самым способствуют нарушению равновесия и формированию обвально-оползневых процессов. Вибрация в свою очередь усугубляет эти негативные явления и при определенном стечении обстоятельств может сыграть роль спускового механизма. Известны также случаи возникновения осадок фундаментов зданий и сооружений под влиянием динамических нагрузок, явившихся причиной их разрушения.

Совместное действие на фундамент статистических и динамических нагрузок приводит к изменению состояния грунта основания. При этом различаются три фазы: уплотнения, образования начальных сдвигов и разрушения [2, 11]. Вибрационное уплотнение происходит за счет уменьшения пористости грунта и может иметь место только в рыхлых грунтах, в частности песчаных со средней плотностью. В глинистых грунтах, обладающих даже небольшим сцеплением, а также в плотных песках вибрационное уплотнение практически не наблюдается. В статически ненагруженных грунтах уплотнение начинается при самых слабых вибрациях и завершается по достижении состояния полного уплотнения при ускорениях вибрации от 0,2 до 2,0 g и более (g — ускорение силы тяжести) в зависимости от коэффициента виброуплотнения грунта. Уплотнение несвязных статически нагруженных грунтов при вибрации может происходить только в тех случаях, когда относительная плотность грунта D меньше некоторой величины D_0, названной О. А. Савиновым [11] максимальной структурной плотностью для данного сложения грунта (его частиц). Виброуплотнение статически нагруженных грунтов начинается при ускорениях вибрации, больших так называемого критического ускорения, величина которого для песков составляет $(0{,}2 \div 2{,}0)g$ и более в зависимости от статического давления, передаваемого на грунт,

влажности, формы и размеров зерен, наличия примесей и других характеристик грунта [1, 11].

В условиях второй фазы напряженного состояния грунта — образования начальных сдвигов — в грунтовой толще появляются области пластических деформаций. При наличии таких областей появление даже относительно небольших динамических нагрузок приводит к образованию сдвигов в толще грунтов, причем в этом случае при определенных условиях уплотнения всей толщи может и не происходить. В связи с этим подобные явления возможны для всяких типов грунтов, кроме плотных глин. К уменьшению сопротивления грунтов сдвигу приводят вибрации разной интенсивности, за исключением весьма малых значений ускорений — порядка $0{,}1 \div 0{,}15\ g$ для песчаных грунтов [8, 11]. Деформации сдвига могут иметь место даже в тех случаях, когда вибрации являются слабыми, а усилие, передающееся на грунт, не достигает предельного значения. При этом деформации протекают с весьма малой постоянной или слабо затухающей скоростью в течение всего времени действия вибрации и, накапливаясь, могут достичь ощутимых величин. Именно этим можно объяснить появление дополнительных динамических осадок зданий, вызванных сотрясениями от движущегося транспорта и другими слабыми вибрациями, так как эти осадки связаны не с уплотнением всей толщи грунта основания, а с образованием в ней малых пластических сдвигов.

При интенсивных вибрациях (от 0,6 до 5,0 g в зависимости от свойств грунтов) происходит разрушение структуры и наблюдаются взаимные перемещения частиц. Грунт может приобретать свойства вязкой среды, в которой сопротивление сдвигу определяется силами вязкого трения. Подобные явления возможны главным образом в водонасыщенных грунтах [7, 8].

Таким образом, поле вибрации оказывается весьма существенным фактором при оценке общей инженерно-геологической обстановки в городах и является «ответственным» за изменение состояния геологической среды, приводящее к негативным последствиям. Поэтому задача оценки и прогноза этого вида техногенного физического воздействия в настоящее время является острой и актуальной.

Оценка техногенного физического воздействия (в том числе вибрационного) на геологическую среду представляет собой достаточно сложную разноплановую задачу и подразумевает определение и классификацию источников и видов, изучение характеристик отдельных источников с определением размеров зон их влияния, исследование особенностей формируемых этими источниками физических полей, а также реакции геологической среды.

Основными источниками вибрации на территории города являются агрегаты с вращающимися элементами, кузнечное и прессовое оборудование промышленных предприятий, строительные механизмы, различные виды транспорта и т. д. Они распределены неравномерно в пределах городских территорий, их концентрация характерна для промышленных зон, где расположены заводы, фабрики и т. п., в то время как в селитебной зоне их сравнительно мало.

Источники вибрационного воздействия могут быть классифицированы по геометрической форме и размерам, по положению относительно геологической среды, по интенсивности и времени действия, по месту нахождения и частоте встречаемости в пределах изучаемой территории [4, 6]. По геометрической форме и размерам они могут быть точечными, линейными, площадными и объемными. Подобное деление в первую очередь определяется величиной исследуемой территории или объемом грунтовой толщи, а также соотношением размеров источника и расстояния до точки наблюдения. При этом площадной и объемный источники

для удобства оценки и вычислений могут быть аппроксимированы простыми геометрическими фигурами.

По положению относительно геологической среды (в качестве верхней границы которой чаще всего принимается дневная поверхность) источники вибрации разделяются на наземные и подземные, что также определяется соотношением реальных размеров источников и расстояниями до точки наблюдения.

По частоте встречаемости (в пределах городской территории) источники можно разделить на а) общегородские, распределенные достаточно равномерно по всей территории города; б) зональные, сосредоточенные в пределах одной функциональной зоны; в) локальные, для размещения которых выделяются особые площади и которые функционально могут быть связаны с городом в целом.

По интенсивности источники вибрационного воздействия могут быть условно разделены на три категории — с низким, средним и высоким уровнем. Низкий уровень не вызывает заметных отклонений геологической среды от ее нормального состояния. Источники со средним уровнем оказывают воздействия, не превышающие допустимых с точки зрения оптимальных условий жизнедеятельности человека, сохранности и нормального функционирования инженерных сооружений. При этом верхними количественными пределами оказываемого воздействия являются величины допустимых значений уровня вибрации, регламентируемые соответствующими нормативными документами. Источники с высоким уровнем интенсивности способны оказывать воздействия, по своим последствиям выходящие за рамки предельно допустимых.

По времени действия источники вибрации целесообразно подразделять на постоянные, периодические и временные.

Особая роль в формировании техногенного вибрационного поля принадлежит транспорту. Транспортные магистрали разной категории, пересекая территорию города, образуют сложную общегородскую систему поверхностных линейных источников вибрации практически постоянного действия. При движении транспорта по улицам города возникают колебания грунта с частотой от 3—5 до 60—70 Гц, причем пиковые значения наблюдаются на частоте 20 Гц [19]. Для удобства изложения в качестве единиц измерения вибрации используются децибелы, что позволяет характеризовать уровень вибрации относительно некоторого порогового уровня. Разность уровней вибрации в 20 дБ соответствует изменению параметра (виброскорости или виброускорения) в абсолютных единицах в 10 раз. Величины виброскорости в соответствии с результатами, полученными рядом исследователей, в том числе и авторами настоящей статьи, изменяются в пределах от 37—40 до 60—65 дБ (от 3,56—5,00 до 50,0—89,7 мкм/с), достигая фоновых значений на расстояниях от 30—40 до 90—100 м от источника в зависимости от интенсивности движения, состава транспортного потока и геологического строения верхней части разреза.

Весьма интенсивным источником вибрации на городских территориях является трамвай. Измерения вибрации от трамвая показали, что значения виброскорости при максимуме в 90—95 дБ по мере удаления от источника уменьшаются по экспоненциальному закону, достигая фоновых значений на расстояниях более 150 м от трамвайного пути. Движение поездов метрополитена (особенно мелкого заложения) вызывает вибрации, частота которых характеризуется средними геометрическими значениями 31,5 и 63 Гц; при этом уровни виброускорений в зоне рельсового стыка типовой конструкции составляют 130—135 дБ, на обделке тоннеля — 90—95 дБ и в грунте на расстоянии 20 м от стены тоннеля — 50—60 дБ [3].

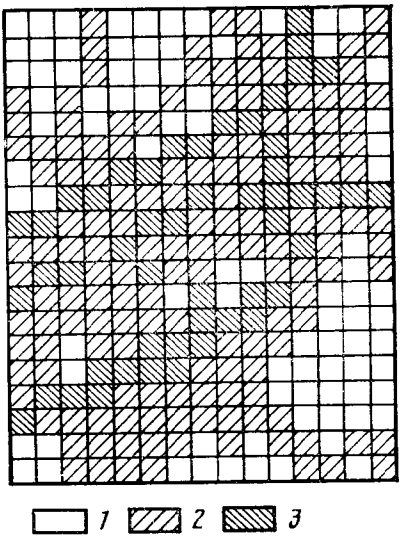
Железнодорожный транспорт является источником колебаний в диапазоне 10—250 Гц, максимальные значения уровня вибрации наблюда-

ются на частотах 18 и 70 Гц [16]. Экспериментальные исследования, проведенные авторами, показали, что максимальный уровень вибрации составляет 100—110 дБ (при измерении виброскорости) и изменяется с удалением от источника по экспоненциальному закону, достигая фоновых значений на расстояниях 100—120 м. В результате измерения уровня вибрации, вызываемой движением поездов вдоль железнодорожной линии на бетонной эстакаде, у основания последней и в грунте в 7,5 м от нее было установлено, что при частоте колебаний от 0 до 1000 Гц пиковые значения виброускорения наблюдаются на частоте 31,5 Гц и достигают 60 дБ [20].

К числу локальных источников вибрации в первую очередь относятся различные строительные машины и механизмы. По данным экспериментальных исследований, при работе строительных машин (экскаваторов, самосвалов, вибрационных катков и т. д.) вибрация грунтов не зависит от их свойств и при изменении вертикальной составляющей вибросмещения составляет менее 55 дБ, что меньше так называемого порога чувствительности вибрации. Исключение составляют некоторые типы бульдозеров, используемых на месторождениях полезных ископаемых при производстве вскрышных работ, которые генерируют вибрацию, достигающую уровня 65 дБ (преимущественно на частотах 16 и 31,5 Гц) на расстоянии 10 м [18].

Достаточно мощным точечным источником вибрации является сваезабивочная машина, однако время ее действия относительно ограничено. Максимальный уровень вибрации при измерении виброскорости достигает 84 дБ, а радиус зоны действия превышает 200 м.

Анализ характеристик источников вибрации в городах показывает, что основными с точки зрения воздействия на геологическую среду и на находящиеся в ней инженерные объекты являются различные виды средств наземного и подземного транспорта. Оценка в природоохранных целях общего техногенного вибрационного воздействия затруднена тем, что суммарное вибрационное поле, формируемое большим количеством источников, распределенных по всей, как правило, значительной территории города, имеет весьма сложный характер. Поэтому возникает необходимость разработки такой методики оценки, которая, с одной стороны, позволяла бы изучать большие площади территории городов и, с другой стороны, не требовала бы проведения многочисленных натурных наблюдений.



Картосхема оценки автотранспортного вибрационного воздействия на территории города: *1* — отсутствие воздействия; *2*— слабое воздействие; *3*— умеренное воздействие

В ряде работ [9, 10, 15] для оценки воздействия отдельного источника вибрации (линии метрополитена, автомобильной дороги) предлагается способ, основанный на определении спектральной плотности сигнала воздействия. Для этого рассматривается расчетная схема взаимодействия конкретного транспортного средства с рельсовым путем или дорожным покрытием во время движения с учетом технических характеристик самого транспортного средства, неровностей и демпфирующих свойств магистрали и ряда других факторов.

В работах [17, 19] приведены эмпирические формулы расчета уровней вибрации, создаваемой автомобильным движением и работой различных промышленных механизмов. Так, например, в [19] вибрация определяется как функция степени неровности дорожного покрытия, веса транспортных средств и скорости их движения.

Относительная сложность и громоздкость указанных способов, необходимость привлечения большого количества дополнительной чисто технической информации, а также то обстоятельство, что эти способы позволяют рассматривать лишь отдельные источники, затрудняют их использование для оценки вибрационного воздействия на значительных по площади участках территории города.

В качестве одного из вариантов можно использовать хорошо известный способ поквадратной оценки территорий. Для этого изучаемая территория разбивается на квадраты и в пределах каждого из них определяются параметры, характеризующие рассматриваемое воздействие. Такой способ был применен на модельных участках ряда городов Московской и Ленинградской областей. В качестве исходной информации использовались данные измерений уровня вибрации на улицах этих городов, величина транспортного потока и плотность уличной сети. Для каждого элементарного квадрата (100×100 м) были определены параметры: плотность уличной сети (м/м²), удельный уровень транспортной вибрации (дБ), интенсивность транспортной нагрузки, представляющая собой произведение величины транспортного потока на суммарную длину магистралей в пределах квадрата (м·тр. ед/ч) и построены картосхемы изменения этих параметров.

В качестве характеристик уровня вибрации и транспортного потока были приняты средние величины для улиц различного значения (общегородского, районного и местного) (табл. 1). По каждому квадрату вычислялся удельный уровень транспортной вибрации, равный отношению суммы произведений уровня вибрации на длину магистрали к суммарной длине уличной сети в пределах квадрата.

Анализ результатов натурных наблюдений, проведенных в семи различных по величине городах (около 170 измерений), показывает, что существует зависимость уровня вибрации (y) от интенсивности транспортного потока (x), которая может быть выражена степенной функцией вида $y=ax^b$, где a и b — постоянные величины, определяемые эмпирически. При этом уровень вибрации, увеличиваясь с ростом величины транспортного потока, достигает предельных значений в 65—70 дБ (при измерении виброскорости).

Анализ данных измерений уровня транспортной вибрации показал, что процесс вибрационного воздействия не является стационарным, если величина транспортного потока не превышает 5 тр. ед/мин (300 тр. ед/ч). Строго говоря, этот процесс не является стационарным практически никогда, однако при значениях x более 300 тр. ед/ч его можно считать квазистационарным. Транспортный поток в 300 тр. ед/ч создает вибрацию, уровень которой составляет 46 дБ при измерении виброскорости. Поэтому эту величину целесообразно принять в качестве первого порогового значения уровня транспортной вибрации.

В нормативных документах и справочной литературе [11—13] приведены допустимые значения уровней вибрации с точки зрения влияния на человека в жилых и общественных зданиях и производственных помещениях, а также значения параметров вибрации (73—96 дБ при измерении виброскорости), при которых необходимо учитывать возможность возникновения осадок зданий вследствие образования в грунтовой толще основания малых пластических сдвигов. Минимальное из указанных значений с точки зрения влияния на геологическую среду, а именно 73 дБ, можно считать вторым предельным значением уровня транспортной вибрации.

Таблица 1

Средние значения уровня транспортной вибрации для различных категорий улиц

Город	Категория улиц	Средний уровень вибрации, дБ	Величина транспортного потока, тр. ед/ч
Ногинск	Общегородского значения	53	891
	Районного значения	47	360
	Местного значения	37	59
Серпухов	Общегородского значения	51	589
	Необщегородского значения	38	93
Сланцы	Общегородского значения	39	157
		40*	184*
	Необщегородского значения	37	64
		39**	85**

* С учетом участка шоссе республиканского значения.
** С учетом участка шоссе районного значения.

Таблица 2

Пределы изменения значений параметров

Параметр	Единица измерения	Низкое воздействие		Среднее воздействие		Высокое воздействие	
		значения	индекс	значения	индекс	значения	индекс
Плотность уличной сети	10^{-2} м/м^2	<100	$А_н$	100÷200	$А_с$	$\geqslant 200$	$А_в$
Интенсивность транспортной нагрузки	10^2·м·(тр. ед/ч)	<300	$Б_н$	300÷600	$Б_с$	$\geqslant 600$	$Б_в$
Удельный уровень транспортной вибрации	дБ	<46	$В_н$	46÷73	$В_с$	$\geqslant 73$	$В_в$

Таким образом, если принять в качестве нормирующей единицы длину стороны элементарного квадрата, равную 100 м, параметры для оценки уровня транспортной вибрации будут иметь значения, указанные в табл. 2. Введение индексов $А_{н,с,в}$, $Б_{н,с,в}$ и $В_{н,с,в}$, обозначающих разные значения соответствующих параметров, позволяет формализовать оценку транспортного воздействия в пределах исследуемой территории. Так, например, квадраты, в пределах которых отмечено следующее сочетание параметров: $Б_н+В_н$, $Б_н+В_с$, $Б_с+В_н$, относятся к участкам со слабым транспортным вибрационным воздействием. Квадраты, которые характеризуются сочетанием параметров $Б_в+В_в$, считаются территориями с сильным воздействием. Все остальные квадраты (за исключением тех, где нет источников, а следовательно, нет и воздействия) могут быть отнесены к участкам с умеренным воздействием.

Таким образом, комплексная оценка транспортного вибрационного воздействия, проведенная на основании анализа распределения значений указанных параметров, позволяет выделять аномальные зоны. Так, на территории модельного участка в г. Ногинске были выделены зоны, характеризующиеся умеренным вибрационным воздействием (рисунок).

Оценка территории по степени вибрационного воздействия играет большую роль при анализе инженерно-геологической обстановки, в частности при выявлении возможностей грунтовой толщи с точки зрения ее несущей способности. Помимо этого, представление о величине динами-

ческой нагрузки, возникающей вследствие транспортного вибрационного воздействия на грунты, необходимо при разработке тех или иных мероприятий, направленных на сохранение необходимых инженерных качеств геологической среды в городах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баркан Д. Д.* Динамика оснований и фундаментов. М.; Л.: Стройвоенмориздат, 1948. 412 с.
2. *Герсеванов Н. М.* Основы динамики грунтовой массы. М.; Л.: Госгеоллитиздат, 1937. 246 с.
3. *Глонти А. Н.* Проблема защиты жилой застройки от шума и вибрации, возникающих при движении поездов метрополитена//Совершенствование перевозочного процесса и технических средств метрополитенов СССР. М.: Изд. ВНИИЖТ МПС СССР. 1983. С. 38—43.
4. *Жигалин А. Д.* Классификация источников и видов техногенного воздействия на геологическую среду.//Деп. в ВИНИТИ № 1871-85 14.03.85. 31 с.
5. *Жигалин А. Д., Локшин Г. П., Просунцова Н. С.* Техногенные физические поля и инженерно-геологическая обстановка в городах//Проблемы инженерной геологии городов. М.: Наука, 1983. С. 69—71.
6. *Жигалин А. Д., Локшин Г. П., Просунцова Н. С.* Принципы классификации источников техногенного физического воздействия на геологическую среду в городах// Проблемы инженерной геологии городов. М.: Наука, 1983. С. 114—115.
7. *Зиангиров Р. С., Кутергин В. Н.* Закономерности и прогноз изменения прочности водонасыщенных глинистых грунтов при вибрации//Инж. геология, 1984. № 3. С. 36—48.
8. *Красников Н. Д.* Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат. 1970. 240 с.
9. *Маковичка Д.* Влияние вибраций, возникающих при строительстве метро на окружающую застройку//Строительная механика и расчет сооружений. 1985. № 1. С. 78—80.
10. *Поляков В. С., Грановский А. Н.* Влияние параметров рельсового основания пути метрополитенов на уровень колебаний обделки тоннелей//Строительная механика и расчет сооружений. 1984. № 1. С. 58—61.
11. *Савинов О. А.* Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. Л.; М.: Стройиздат, 1964. 346 с.
12. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий СН 245-71. М.: Изд-во Минздрава СССР, 1972. 42 с.
13. Санитарные нормы допустимых вибраций в жилых зданиях СН 1304-75. М.: Изд-во Минздрава СССР, 1975. 36 с.
14. *Ямщиков В. С.* Волновые процессы в массиве горных пород. М.: Недра, 1984. 272 с.
15. *Le Houedec D.* Response of a roadway lying on an elastic foundation to random traffic loads.//J. Appl. Mechanics. 1980. V. 47. P. 145—149.
16. *Melke J., Kraemer S.* Diagnostic methods in the control of railway noise and vibration//J. Sound and Vibration. 1983. V. 87. № 2. P. 377—386.
17. *Nakano A.* Стандартные способы расчетов и прогнозирования вибраций при оценке воздействия вибраций и способ расчета уровня вибрации промышленных механизмов//РРМ. 1983. 14. № 9. С. 18—23.
18. *Sioda M.* Шум, вибрация грунта, инфразвук, вызываемые строительными машинами. Канкэ гидзюцу. Environ. Conserv. Eng. 1983. V. 12. № 6. P. 373—376.
19. *Tokita Y., Oda A.* On the characteristics of ground vibration generated by the traffics.//Inter-Noise-75. Proc. Internat. Conf. Noise Contr. Eng., Sendai. 1975. P. 511—514.
20. *Towers D. A.* Estimation and control of ground vibration from trains on concrete elevated structures//Noise Control Engng. 1982. V. 19. № 1. P. 26—33.

Институт литосферы АН СССР

Поступила в редакцию
15.II.1986

УДК 624.131.23.1 : 519(477)

БОРЕЙКО Л. Г.

ИЗУЧЕНИЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ

Введение

Палеогеографическая реконструкция процесса осадконакопления лёссовых пород — важный этап их инженерно-геологической оценки, в котором существенную роль играет изучение стратиграфической последовательности различных генетических типов лёссовых пород.

Моделью стратиграфической последовательности лёссовых пород может служить цепь Маркова. Процесс обладает марковскими свойствами, если вероятность каждого последующего перехода зависит от предшествующего состояния.

Марковские свойства присущи многим геологическим процессам, в том числе, как будет показано ниже, стратиграфической последовательностей лёссовых пород. Марковские свойства стратиграфических последовательностей лёссовых пород могут использоваться при построении их вероятностных динамических моделей, включающих один или более случайных компонентов и являющихся промежуточными между чисто случайными и детерминированными.

Исходные данные

Стратиграфическую последовательность лёссовых пород можно изучать в различных аспектах, в том числе как чередование типичных лёссов и горизонтов ископаемых почв. По М. Ф. Векличу [1], в толще лёссовых пород УССР выделяется 16 стратиграфических горизонтов, из них 8 почвенных. В настоящей работе использована часть опубликованных материалов [2] по опорным геологическим разрезам антропогена Украины.

Марковские свойства стратиграфической последовательности лёссовых пород рассматривались как смена состояний стратиграфических горизонтов — лёсс, ископаемая почва. В свою очередь, каждый горизонт ископаемых может быть представлен типичными почвами (черноземами) и бурыми или красновато-бурыми суглинками. Два указанных состояния ископаемых почв имеет смысл выделять, исходя из различий условий их образования, а также из различий их инженерно-геологических свойств. В табл. 1 приведен пример используемых данных.

Вычисление матрицы частот и вероятностей перехода

Смена состояний стратиграфических горизонтов может быть описана с помощью модели марковской цепи и в сжатом виде представлена матрицей вероятностей перехода. При этом деление на почву, суглинок и

Таблица 1

Пример исходных данных для вычисления матрицы переходных вероятностей (Запорожье, скважина 27 [2])

Отметка подошвы горизонта, м	Стратиграфический горизонт	Характеристика состояния	Индекс состояния
0,5	Голоценовый	Чернозем обычный	1
1,2	Причерноморский	Лёсс	3
2,2	Дофиновский (d_2)	Бурый степной грунт	2
3,4	Дофиновский (d_3)	Чернозём	1
8,5	Бугский	Лёсс	3
10,0	Витачевский	Коричнево-бурый, серовато-коричневый грунт	2
10,7	Удайский	Лёсс	3
11,4	Прилукский (p_2)	Коричнево-бурый солонцеватый грунт	2
12,2	Прилукский (p_3)	Чернозем	1
13,8	Тясминский	Лёсс	3
15,2	Кайдакский	Бурый лесной грунт (переход к чернозему)	2
20,2	Днепровский	Лёсс	3
22,1	Завадовский (z_2, z_3)	Слаборазвитый красновато-коричневый грунт	2
22,5	Тилигульский	Лёсс	3
24,3	Лубенский	Красновато-коричневый грунт	2

лёсс условно, поскольку и почвы, и лёссы могут быть представлены суглинками.

Матрицу вероятностей перехода для трех указанных состояний можно записать в следующем виде:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix},$$

где P_{ij} — вероятность перехода из состояния i в состояние j; i, $j = 1 \div m$ (m — число возможных состояний).

Кроме использованной нами возможности оценки вероятностей перехода путем подсчета переходов между стратиграфическими горизонтами, аналогичную оценку можно получить, анализируя переходы между интервалами заданной мощности.

Вычисленные частоты и вероятности переходов (снизу вверх) для трех состояний в разрезе лёссовых пород, описанном в табл. 1, помещены в табл. 2.

Вероятность перехода является условной и вычисляется как отношение частоты перехода (n_{ij}) из состояния i в состояние j к сумме частот по строке:

$$P_{ij} = n_{ij} \Big/ \sum_{j=1}^{m} n_{ij}.$$

Обратимся к матрице переходных вероятностей (табл. 2) и проанализируем возможные переходы для трех состояний лёссовых пород. От почвы возможен переход только к суглинкам ($P_{12} = 1{,}0$). Равна единице и вероятность перехода от суглинков к лёссам ($P_{23} = 1{,}0$). Равновероятен переход от лёссов к почвам и суглинкам ($P_{31} = P_{32} = 0{,}5$). В остальных случаях вероятность перехода равна нулю. Приведенный пример ввиду малого объема данных не дает реального представления о характере вероятностей перехода трех указанных состояний лёссовых пород.

Таблица 2

Пример вычисления частот и вероятностей переходов

Исходное состояние	Частоты и вероятности перехода к состоянию			Сумма по строке
	Почва	Суглинок	Лёсс	
Почва	0 0,0	2 1,0	0 0,0	2 1,0
Суглинок	0 0,0	0 0,0	6 1,0	6 1,0
Лёсс	3 0,5	3 0,5	0 0,0	6 1,0

Примечание. В числителе—частоты, в знаменателе—вероятности перехода.

Таблица 3

Матрица частот и вероятностей переходов по данным работы [2]

Исходное состояние	Частоты и вероятности перехода к состоянию			Сумма по строке
	Почва	Суглинок	Лёсс	
Почва	2 0,059	19 0,559	13 0,382	34 1.0
Суглинок	5 0,089	3 0,054	48 0,857	56 1,0
Лёсс	37 0,570	27 0,415	1 0,015	65 1,0

В табл. 3 помещены результаты вычисления матрицы частот и вероятностей перехода, которые получены посредством обработки данных по 12 разрезам лёссовых пород УССР [2].

Моделирование стратиграфической последовательности лёссовых пород

Рассмотрим матрицу вероятностей перехода (табл. 3) в куммулятивной форме

$$\begin{bmatrix} 0{,}059 & 0{,}618 & 1{,}000 \\ 0{,}089 & 0{,}143 & 1{,}000 \\ 0{,}570 & 0{,}985 & 1{,}000 \end{bmatrix}.$$

Выберем наудачу начальное состояние. С помощью таблицы или датчика псевдослучайных чисел получим случайное число, равномерно распределенное в интервале 0,0—1,0 и определим следующее состояние стратиграфической последовательности. Например, начальное состояние нами определено как суглинок. Равномерно распределенное в интервале 0,0—1,0 случайное число равно 0,07, тогда следующее состояние стратиграфической последовательности (0,07<0,089) — почва. Повторив указанный цикл необходимое число раз, можно построить модель стратиграфической последовательности лёссовых пород, опираясь на матрицу переходных вероятностей и датчик псевдослучайных чисел.

Процедуры вычисления матрицы частот переходов и переходных вероятностей по конкретным данным, а также моделирование стратиграфической последовательности были запрограммированы автором для ЭВМ СМ 1407 на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV и реализованы в операционной системе RSX (версия 3,0).

Программа моделирования стратиграфической последовательности включает две подпрограммы:

1. MARDAT — ввод данных, вычисление матрицы частот и переходных вероятностей.
2. MARCOV — моделирование стратиграфической последовательности.

Подпрограмма MARCOV включает обращение к системной процедуре RANDU, генерирующей равномерно распределенные псевдослучайные числа в интервале 0,0—1,0.

Ниже приведена стратиграфическая последовательность лёссовых пород, смоделированная на основе матрицы переходных вероятностей из табл. 3.

Состояние лёссовых пород
Почва
Лёсс
Почва
Лёсс
Почва
Лёсс
Бурые суглинки
Лёсс
Бурые суглинки
Почва
Лёсс
Бурые суглинки
Лёсс
Почва
Бурые суглинки
Лёсс

Важным моментом в моделировании стратиграфических последовательностей является статистическая проверка наличия марковских свойств. Для этого проверяется гипотеза о независимости событий, образующих изучаемую последовательность, путем вычисления величины [3]

$$-2 \ln \lambda = 2 \sum_{i,\,j}^{m} n_{ij} \ln (P_{ij}/P_j)$$

Величина $-2 \ln \lambda$ распределена как χ-квадрат с $(m-1)^2$ степенями свободы. По данным табл. 3, она равна 129, 36. При числе степеней свободы $(3-1)^2=4$ и заданной доверительной вероятности ($\alpha=0{,}05$) табличное значение χ-квадрат, равное 9,49, меньше вычисленного. Следовательно, нулевую гипотезу о независимости наблюдаемых в 12-ти разрезах переходов необходимо отклонить и принять предположение о том, что последовательность обладает марковскими свойствами.

Рассмотренные примеры относятся к модели марковской цепи первого порядка, когда каждое последующее состояние зависит только от одного предыдущего. Оценку вероятности перехода более чем в один шаг мы не рассматриваем и отсылаем к работе [3], в которой эти и другие

Таблица 4

Матрицы переходных частот и вероятностей для двух временных интервалов осадконакопления

Исходное состояние	Частоты и вероятности перехода к состоянию			Сумма по строке
	Почва	Суглинок	Лёсс	
	Верхний антропоген			
Почва	0 / 0,0	11 / 1,0	0 / 0,0	11 / 1,00
Суглинок	0 / 0,0	0 / 0,0	21 / 1,0	21 / 1,0
Лёсс	22 / 0,916	1 / 0,042	1 / 0,042	24 / 1,0
	Средний и нижний антропоген			
Почва	1 / 0,053	5 / 0,263	13 / 0,684	19 / 1,00
Суглинок	5 / 0,157	1 / 0,031	26 / 0,812	32 / 1,00
Лёсс	14 / 0,389	22 / 0,611	0 / 0,00	36 / 0,00

вопросы моделирования стратиграфических последовательностей рассмотрены достаточно подробно.

Если стратиграфическую последовательность разбить на несколько интервалов и для каждого из них вычислить матрицу переходных вероятностей, то при наличии равенства матриц можно говорить о стационарности марковских цепей.

Для проверки стационарности марковских цепей каждый из 12 анализируемых разрезов был разбит на два интервала по времени осадконакопления. Первый интервал соответствует нижнему и среднему антропогену, второй — верхнему антропогену. В табл. 4 помещены две матрицы переходных вероятностей, соответствующие двум указанным временным интервалам. Для проверки стационарности марковского процесса в данном случае можно использовать критерий Андерсона и Гудмана [3]. Наиболее характерные различия наблюдаются в смене состояний почва — лёсс (для верхнего антропогена вероятность указанного перехода равна нулю, для среднего и нижнего антропогена — 0,684) и лёсс — суглинок (для верхнего антропогена вероятность перехода близка к нулю — 0,042, для среднего и нижнего — 0,611).

Выводы

1. Анализ стратиграфических последовательностей лёссовых пород УССР показал, что они обладают марковскими свойствами. Стратиграфическая последовательность лёссовых пород верхнего антропогена подчиняется одним закономерностям, а среднего и нижнего антропогена — другим, что говорит об изменении условий осадконакопления в два указанных промежутка времени, показывает нестационарный характер марковских цепей и отвергает цикличность в осадконакоплении лёссовых пород УССР в строгом смысле этого слова.

2. Для лёссовых пород верхнего антропогена наиболее характерной является последовательность лёсс — почва — суглинок — лёсс, для среднего и нижнего — лёсс — суглинок — лёсс — почва — лёсс.

Таким образом, сочетание одновременно двух генетических типов ископаемых почв (черноземов и бурых суглинков) характерно только для верхнего антропогена, в меньшей степени — для среднего и практически исключается в нижнем антропогене.

3. Матрица переходных вероятностей является удобным средством сжатого описания стратиграфических последовательностей. На основе вычисления матриц переходных вероятностей возможно создание вероятностных динамических моделей стратиграфических последовательностей лёссовых пород, а также обобщенное описание и сравнение совокупностей разрезов пород различных районов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Веклич М. Ф.* Стратиграфия лёссовой формации Украины и соседних стран. Киев: Наук. думка, 1968.
2. *Веклич М. Ф., Сиренко Н. О., Дубняк В. А. и др.* Развитие грунтов Украины в позднем кайнозое. Киев: Наук. думка, 1973.
3. *Харбух Дж., Бонэм-Картер Г.* Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: Мир, 1974.

Институт геологических наук АН УССР

Поступила в редакцию 9.I.1986

УДК 624.131.439.1

КРЫЖАНОВСКИЙ А. Л., ШЕЛЯПИН Р. С., ХОМЯКОВ В. А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ТРЕНИЯ ГРУНТА В СРЕЗНОМ ПРИБОРЕ

Сопротивление сдвигу связных и сыпучих грунтов определяется в приборах как прямого среза, так и трехосного сжатия. Интерпретация результатов испытаний для грунтов с выраженными структурными связями убедительна. На участке кривых *ОА* (рис. 1, 2) сопротивление сдвигу обусловлено прочностью структурных связей; на участке *АБ* происходит разрушение части структурных связей и мобилизация сил внутреннего трения: в точке *Б* структурные связи разрушены и сопротивление сдвигу определяется силами сухого кулоновского трения. В случае сыпучих грунтов пиковое сопротивление сдвигу объясняется тем, что в зоне плоскостей среза плотность грунта оказывается большей, чем на стадии остаточного сопротивления. Считается, что большей плотности соответствует и большее значение угла трения. Участок *АБ* объясняется эквивалентным уменьшением плотности грунта. Опыты с сыпучими грунтами на аппаратуре трехосного сжатия не подтверждают этого предположения, например, при испытании как плотных, так и рыхлых песков можно получить диаграмму как с пиком сопротивления, так и без пика в зависимости от траектории деформирования (рис. 2). При этом точкам пика и остаточного сопротивления сдвигу будет отвечать различная плотность в пределах от максимального до минимального возможного ее значения. Сомнения в истинности физической интерпретации пикового сопротив-

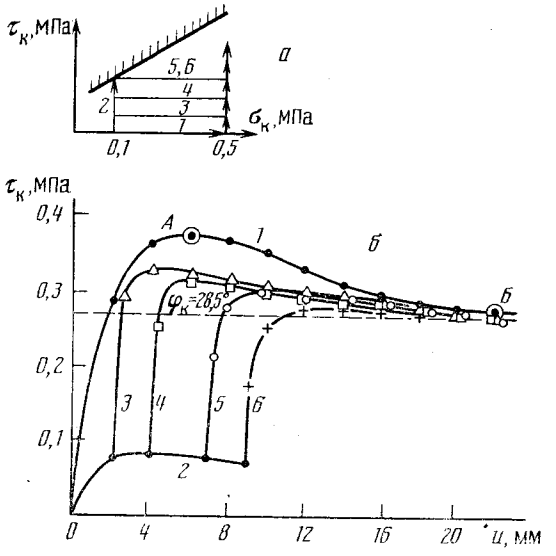


Рис. 1. Сопротивление сдвигу песчаного грунта по данным испытаний в срезном приборе при начальной плотности $\rho = 1{,}82$ т/м³: *а* — траектории деформирования песка (схемы испытаний); *б* — зависимости $u = u(\tau_к/\sigma_к)$ при испытаниях по схемам *1—6*

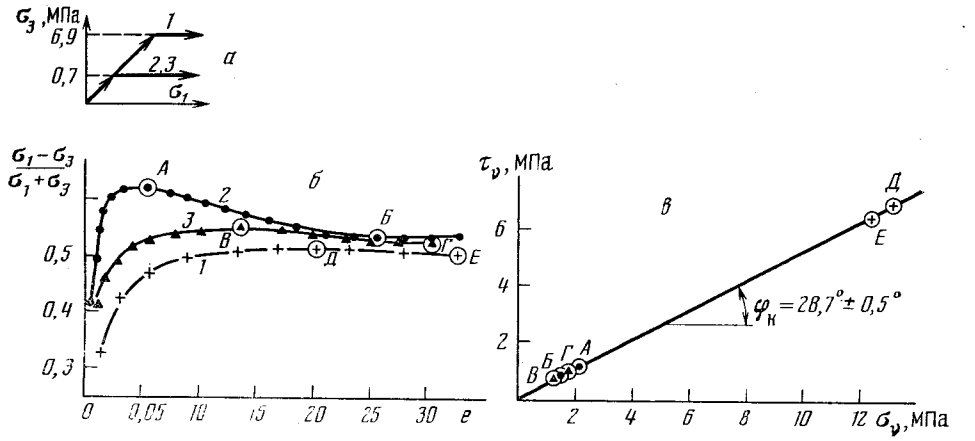


Рис. 2. Сопротивление сдвигу песка по результатам трехосных испытаний: *а* — схемы нагружения образцов в стабилометре; *б* — результаты испытаний по схемам *1—3* (*1* — плотный песок с $\rho_н = 1{,}80$ т/м³, $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const} = 6{,}96$ МПа; *2* — плотный песок с $\rho_н = 1{,}80$ т/м³, $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const} = 0{,}7$ МПа; *3* — рыхлый песок с $\rho_н = 1{,}62$ т/м³, $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const} = 0{,}7$ МПа); *в* — зависимость $\tau_ν$ от $\sigma_ν$ в состоянии предельного равновесия по фактической площадке скольжения

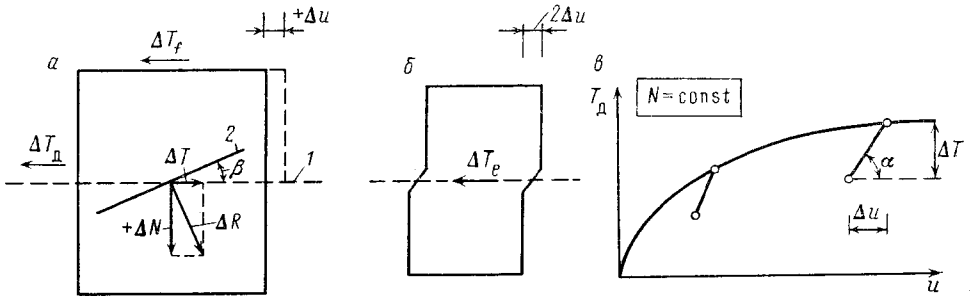


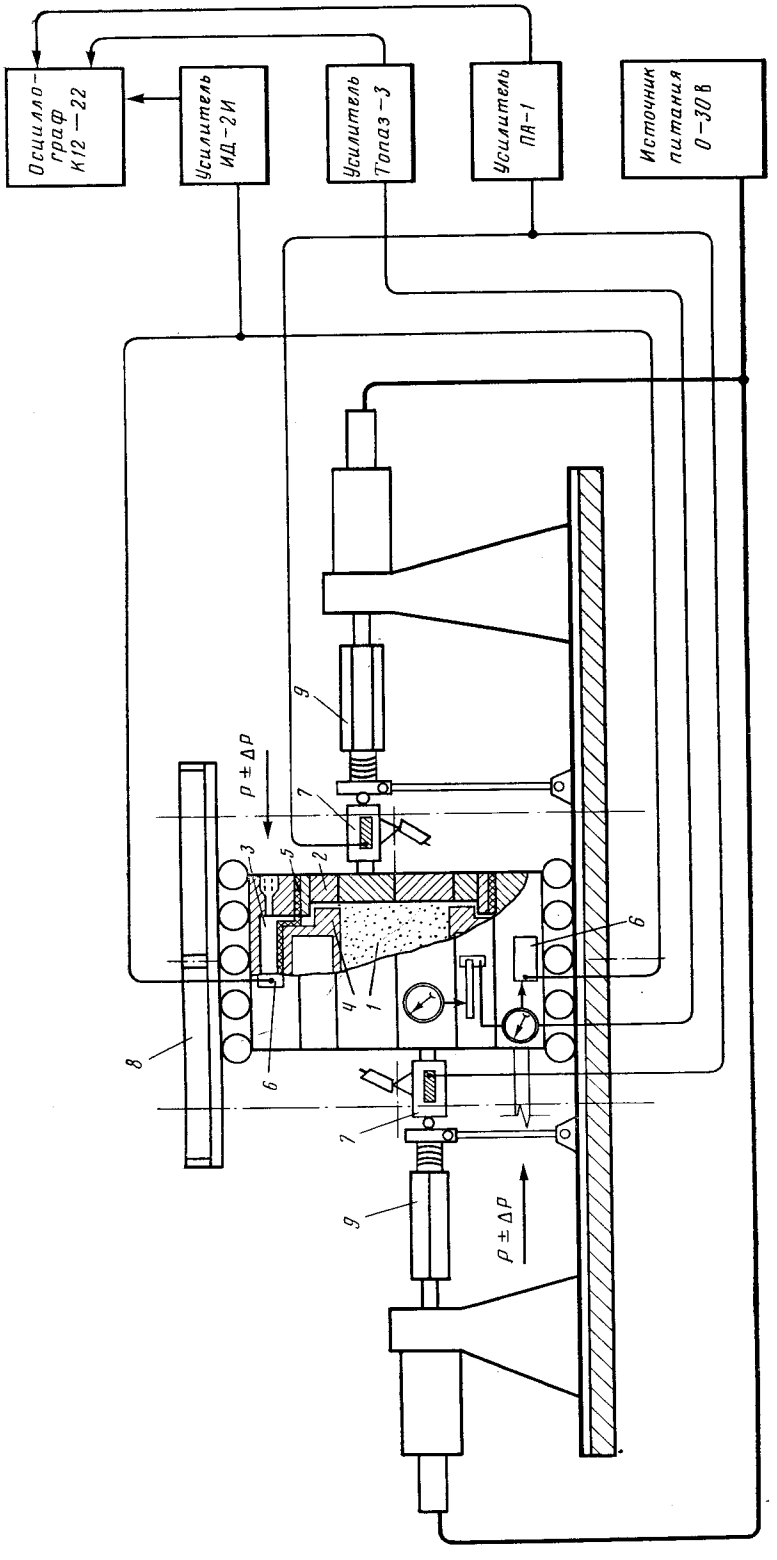
Рис. 3. Схемы к определению ориентации фактической площадки сдвига в срезном приборе: *а* — изменение сил в плоскости сдвига при импульсе нагрузки ΔN: *1* — конструктивная плоскость среза, *2* — усредненное положение расчетной плоскости сдвига; *б* — схема упругого сопротивления образца при перекашивании; *в* — схема к определению значений «модуля» сдвига G образца в сдвиговом приборе при разгрузке

ления сдвигу сыпучих грунтов побудили к поиску других причин немонотонности зависимостей сопротивления сдвигу от перемещения сдвигаемых обойм (для срезных приборов) или деформации образца (для приборов трехосного сжатия).

В работах [4, 6] рассмотрено допущение, что сдвиг грунта в срезном приборе происходит по системе плоскостей (фактические плоскости сдвига), не совпадающих с конструктивной плоскостью среза. Конструктивная плоскость среза определяется плоскостью контакта сдвигаемых обойм. В процессе сдвига фактические плоскости наклонены к конструктивной под углом β. Угол β изменяется в процессе сдвига и равен нулю при достижении остаточного сопротивления сдвигу. Значение β в допредельном состоянии зависит от начальной плотности сыпучего грунта, последовательности изменения нормального N и касательного T усилий в срезном приборе и крупности частиц. Формулы для определения касательного $\tau_ф$ и нормального ($\sigma_ф$) напряжений, действующих на фактической плоскости, имеют вид

$$\tau_ф = \tau_к - \sigma_к \operatorname{tg} \beta, \quad \sigma_ф = \sigma_к + \tau_к \operatorname{tg} \beta, \qquad (1)$$

где $\tau_к$ и $\sigma_к$ — касательное и нормальное напряжение на конструктивной плоскости среза.


Осциллограф К12—22
Усилитель ИД-2И
Усилитель Топаз-3
Усилитель ПА-1
Источник питания 0-30 В
P ± ΔP
P ± ΔP
1
2
3
4
5
6
7
8
9

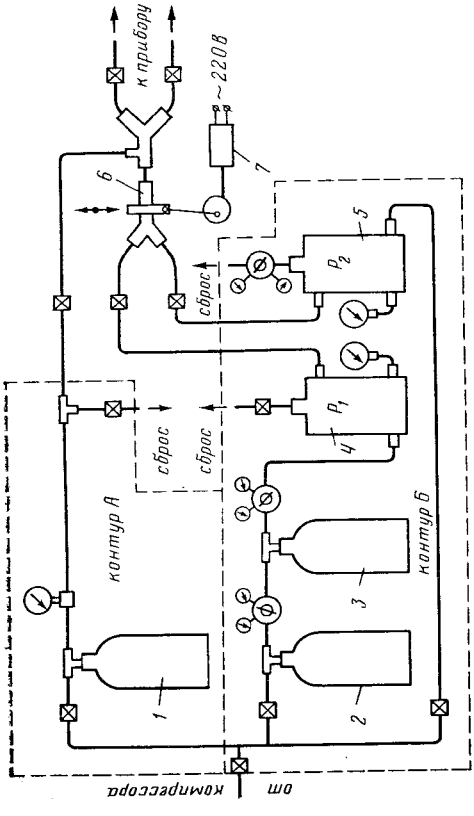


Рис. 4. Экспериментальная установка: *а* — конструктивная схема срезного прибора: *1* — рабочая камера, *2* — обоймы, *3* — воздушная камера, *4* — полый штамп; *5* — мембрана, *6* — датчики давления, *7* — динамометры, *8* — крышка, *9* — винтовой домкрат; *б* — конструктивная схема нагружателя-пульсатора: *1, 2, 3* — компенсационные баки, *4, 5* — баки с редукторами, *6* — перепускной клапан, *7* — электропривод

В соответствии с (1) монотонно возрастающей зависимости $u=u(\tau_ф/\sigma_ф)$ может отвечать немонотонная зависимость $u=u(\tau_к/\sigma_к)$ (u — перемещение обойм сдвигового прибора). Вид зависимости $u=u(\tau_к/\sigma_к)$ определяется изменением $\beta=\beta(u_i)$.

Качественное подтверждение изложенного допущения получено при испытании песка Люберецкого карьера при сдвиге по схемам *1—6*, показанным на рис. 1, *а* [6]. В схеме *1* σ_n=const=0,5 МПа и $\tau_к$ изменяется по опытным данным в соответствии с графиком *1* (рис. 1, *б*). В схеме *2* $\sigma_к$=const=0,1 МПа. В схеме *3* производится некоторый сдвиг при $\sigma_к$=0,1 МПа, затем $\sigma_к$ увеличивается до 0,5 МПа и дальнейшее увеличение $\tau_к$ происходит при постоянном его значении. Схемы *4, 5, 6* отличаются от схемы *3* значением перемещения при $\sigma_к$=0,1 МПа. При предварительном перемещении уменьшается значение β, и это должно привести к уменьшению пикового сопротивления $\tau_к$, что и подтвердил опыт.

Полученный результат хорошо согласуется с данными интерпретации результатов испытаний песка в приборах трехосного сжатия. На рис. 2 показаны результаты испытаний песка по данным, приведенным в работе А. У. Бишопа [1]. Видно, если рассмотреть процесс сдвига на площадках действия максимальных касательных напряжений, то устанавливается пиковое (точки *А, В, Д*) и остаточное (точки *Б, Г, Е*) значения угла отклонения. В то же время эти результаты при их обработке в предположении переменной ориентации площадок скольжения с нормалью ν [2, 3], обосновывают единственную зависимость между τ_ν и σ_ν в состоянии предельного равновесия, объединяющую точки пикового и остаточного сопротивлений для песков различной плотности. Это показывает график на рис. 2, *в*. Эксперимент подтверждает практически равные значения угла трения при определении его значения в срезных приборах и приборах трехосного сжатия [4].

Приведенные данные подчеркивают важность непосредственной

экспериментальной фиксации зависимости $\beta=\beta(u)$ по результатам испытаний грунта в срезном приборе. Если опыт подтвердит монотонное возрастание отношения $\tau_ф/\sigma_ф$ (с учетом указанной зависимости), то можно будет считать, что пиковое сопротивление сдвигу сыпучего грунта не имеет практически полезного механического и физического содержания.

Зададим в сдвиговом опыте нормальное напряжение, изменяющееся по закону $\sigma_к=\sigma_{к,\,ср}\pm\Delta\sigma_к$, где $\sigma_{к,\,ср}$ — среднее значение нормального напряжения на конструктивной плоскости среза, принимаемое постоянным в процессе сдвига, $\Delta\sigma_к$ — пульсирующая часть нормального напряжения, изменяющаяся во времени по графику синусоиды с заданной частотой A. Сдвиг осуществляется по кинематической схеме: задается постоянная скорость перемещения сдвигаемых обойм $\dot{u}$ и фиксируется соответствующее усилие T. Опыт показывает, что u возрастает не монотонно, а с горизонтальными колебаниями сдвигаемых обойм: $u_i=u_{i,\,ср}\pm\Delta u_i$, где $u_{i,\,ср}$ — среднее значение принудительного перемещения обойм на заданное время t_i, Δu_i — пульсирующая часть перемещения обойм, обусловленная изменением напряжения $\Delta\sigma_к$. Соответственно опыт показывает и изменение T_i, фиксируемое динамометром, на величину $\pm\Delta T_i$. При горизонтальном положении поверхностей скольжения можно ожидать, что положительное $\Delta\sigma_к$ вызывает положительное ΔT_i, а отрицательное $\Delta\sigma_к$ — отрицательное ΔT_i, поскольку изменению нормального напряжения на $\Delta\sigma_к$ соответствует изменение «жесткости» образца. При положительном $\Delta\sigma_к$ приращение Δu должно быть меньшим, чем среднее значение перемещения, заданного в опыте, но положительным, а при отрицательном $\Delta\sigma_к$ — большим среднего значения и тоже положительным. Опыт с песчаным грунтом показывает, что при положительном $\Delta\sigma_к$ имеем отрицательное ΔT_i и положительное Δu_i; при отрицательном $\Delta\sigma_к$ имеем положительное ΔT_i и отрицательное Δu_i. Это противоречие легко объясняется в том случае, если $\beta\neq0$. При $\beta=0$, отвечающем остаточному сопротивлению сдвигу, наблюдается полное соответствие величин $\Delta\sigma_к$, ΔT, Δu в случае горизонтального положения площадки скольжения.

Рассмотрим схему на рис. 3, *а*, где ΔN — положительное приращение нормальной силы, R — результирующее усилие, которое принимается нормальным к плоскости *2*, ΔT — приращение горизонтально действующей силы, которая вызывает приращение перемещения Δu, ΔT_f — приращение усилия в упорных катках, $\Delta T_д$ — уменьшение усилия, фиксируемого динамометром за счет возрастания перемещения Δu. На рис. 3, *б* ΔT_e — упругое сопротивление образца при перекашивании. При этом угол β можно вычислить по формуле

$$\operatorname{tg}\beta=\frac{\Delta T}{\Delta N}=\frac{\Delta T_e+\Delta T_f+\Delta T_д}{\Delta T};\qquad(2)$$

$$\beta=\operatorname{arctg}\left(\frac{G\Delta u+\Delta N_f+\Delta T_д}{\Delta N}\right),$$

где G — «модуль» упругого сдвига образца в приборе (его значение определяется при разгрузке в соответствии со схемой рис. 3, *в*, $G=\operatorname{tg}\alpha$), f — коэффициент трения качения.

В опытах применен модифицированный вариант сдвигового прибора [5], дополнительно снабженный задающим нагружателем-пульсатором (рис. 4). Прибор (рис. 4, *а*) позволяет производить сдвиг образца с заданной скоростью смещения обойм. Это происходит за счет вращения винтового домкрата, закрепленного на валу электродвигателя с системой редукторов. Рабочую камеру прибора образуют две обоймы стаканного типа, установленные на роликовые каретки; нижняя упирается в стол прибора, верхняя — в крышку. Давление на образец осуществляется подачей воздуха в камеру; отсюда оно через резиновую

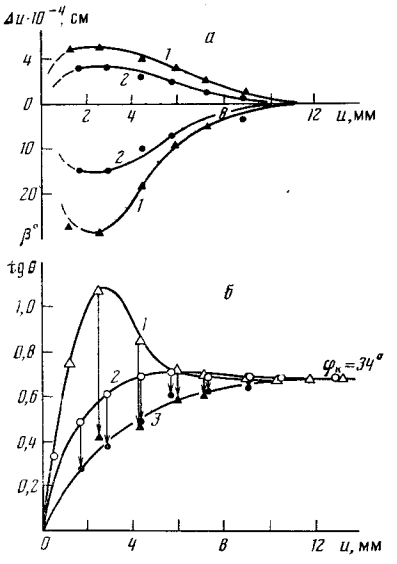


Рис. 5

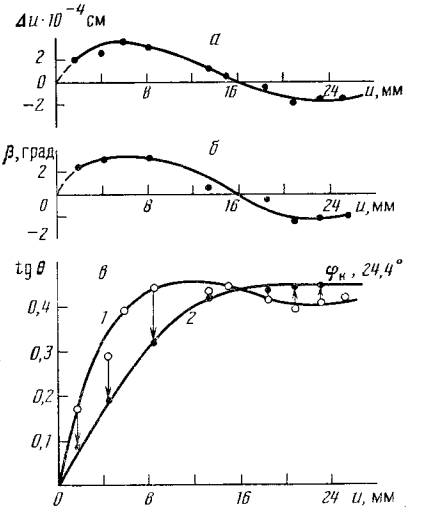


Рис. 6

Рис. 5. Результаты испытаний песка при $\sigma_{к,ср} \pm \Delta\sigma_к = 0{,}3 \pm 0{,}1$ МПа, $\dot{u} = 0{,}1$ мм мин, $A = 0{,}5$ Гц: *а* — зависимости $\Delta u_i = \Delta u_i(u_i)$ и $\beta = \beta(u_i)$; *б* — зависимости $\operatorname{tg}\theta = \tau_к/\sigma_к$; *1* — плотный песок; *2* — рыхлый песок; *3* — зависимость $\operatorname{tg}\theta' = \tau_ф/\sigma_ф$ по фактической плоскости сдвига для плотного и рыхлого песка

Рис. 6. Результаты испытаний супеси при $\sigma_{к,ср} \pm \Delta\sigma_к = 0{,}5 \pm 0{,}1$ МПа, $\dot{u} = 0{,}1$ мм/мин; $A = 0{,}5$ Гц: *а* — зависимость $\Delta u_i = \Delta u_i(u_i)$; *б* — зависимость $\beta = \beta(u_i)$; *в* — диаграммы сопротивления сдвигу; *1* — диаграмма $\operatorname{tg}\theta = \tau_к/\sigma_к$; *2* — диаграмма $\operatorname{tg}\theta' = \tau_ф/\sigma_ф$

мембрану и полый штамп передается на грунт. Для контроля давления воздуха в камере *3* установлены индуктивные датчики давления ДД-10, фиксирующие изменение $N \pm \Delta N$ на ленте осциллографа К12-22. Изменение горизонтального усилия $T \pm \Delta T$ фиксируется динамометрами, а установленные там же тензодатчики позволяют записывать это изменение на осциллограмме. Общее перемещение обойм Δu_i контролируют индикаторы часового типа ИЧ-10. Импульсное перемещение обойм u_i измеряет тензорезисторный датчик перемещений и регистрирует их на ленте осциллографа. Схема задающего нагружателя-пульсатора (рис. 4, *б*) состоит из двух контуров: контур *А* — для задания статических нагрузок, контур *Б* — для задания пульсирующих нагрузок. Система компенсационных баков и редукторов служит для поддержания постоянного давления P_1. Бак *5* с редуктором поддерживает постоянным давление P_2 ($P_1 > P_2$). При включении электропривода перепускной клапан последовательно с заданной частотой соединяет баки *4* и *5* с камерами *3* прибора (рис. 4, *а*), осуществляя циклическое нагружение (до P_1) и разгрузку (до P_2) исследуемого образца. Регулируемые частоты могут меняться от 0,1 до 5 Гц, а нормальное давление — от 0 до 0,2 МПа.

Ниже излагаются результаты испытаний трех разновидностей материалов — песчаного грунта в предельно плотном и предельно рыхлом состоянии, супеси нарушенной структуры и гипсопесчаной смеси. Песчаный грунт считается характерным сыпучим материалом, показывающим пиковое сопротивление в плотном состоянии и только остаточное — при рыхлом начальном состоянии. При испытании супеси предполагалось выявить характерные особенности взаимного расположения плоскостей *1* и *2* (рис. 3, *а*) в процессе сдвига. Гипсопесчаная смесь — это эквивалентный материал, моделирующий работу грунтов с выраженными структурными связями.

Песок отобран в районе строительства сооружений Каневской ГАЭС. Это кварцевый, мелкий, однородный песок; его плотность ρ в предельно рыхлом и предельно плотном состоянии равна соответственно 1,6 и 1,82 г/см³, влажность — 0,01. Супесь нарушенной структуры из района строительства Копетдагской плотины имеет удельный вес частиц 2,68 т/м³, плотность — 1,68 т/м³, влажность — 0,12, число пластичности — 0,03, предел текучести — 0,23.

Гипсопесчаная смесь с соотношением компонентов вода : гипс : песок = 1,4 : 1,0 : 0,5 и резиновой крошкой изучалась в структурном и нарушенном (порошковом) состоянии. Резиновая крошка добавлялась из расчета 5% от общего объема изготовляемого монолита. В структурном состоянии ее удельная плотность равна 2,06 т/м³, объемная плотность — 0,84 т/м³, влажность — 0,11, коэффициент пористости — 1,73, прочность на сжатие — 1,25 МПа; в нарушенном состоянии плотность исследованной смеси равна 1,25 т/м³, начальная влажность — 0,11 (по данным В. Л. Кубецкого).

Программа испытаний всех трех материалов однотипна: задается значение $\sigma_к$; далее осуществляется принудительный сдвиг при заданной $\dot{u}$, при этом нормальное напряжение изменяется по закону $\sigma_к = \sigma_{к,ср} \pm \Delta\sigma_к$; фиксируются u_i и $\pm\Delta u_i$, T_i и $\pm\Delta T_i$. По этим данным устанавливаются зависимости $\Delta u_i = \Delta u_i(u_i)$. Используя (2), определяется $\beta = \beta(u_i)$. Используя (1), определяется $\tau_ф = \tau_ф(u_i)$, и этот результат сопоставляется с зависимостью $\tau_к = \tau_к(u_i)$, устанавливаемой традиционным методом. На рис. 5 показаны результаты испытания песка. При сдвиге плотного песка перемещения Δu больше, чем при сдвиге рыхлого. Величины Δu и β имеют максимальные значения при перемещении $u_i = 1-3$ мм и затем уменьшаются до 0. Зависимости $\operatorname{tg}\theta = \tau_к/\sigma_к$ от u_i резко различаются между собой (кривые *1* и *2* на рис. 5, *б*). Этот результат подтверждает многочисленные литературные данные подобных испытаний. Тем не менее $\operatorname{tg}\theta' = \tau_ф/\sigma_ф$ практически одинаковым образом зависит от u_i как для плотного, так и для рыхлого песка. Эта зависимость показана кривой *3* (стрелками показано изменение значений отношения τ/σ при учете угла β). Характерно, что $\operatorname{tg}\theta'$ монотонно возрастает и приближается к единому для плотного и рыхлого песка предельному сопротивлению сдвигу со значением $\operatorname{tg}\theta'_{max} = \operatorname{tg}\varphi_к = 0{,}675$ ($\varphi_к = 34^c$). Отметим, что это же значение $\varphi_к = 34°$ было получено и при ис-

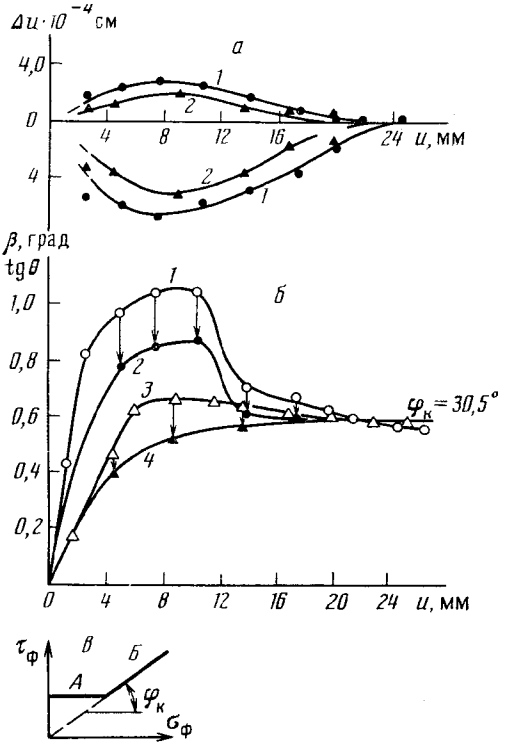


Рис. 7. Результаты испытаний гипсопесчаной смеси при $\sigma_{к,ср} \pm \Delta\sigma_к = 0{,}5 \pm 0{,}1$ МПа; $\dot{u} = 0{,}1$ мм/мин; $A = 0{,}5$ Гц: *а* — экспериментальные зависимости $\Delta u_i = \Delta u_i(u_i)$ и $\beta = \beta(u_i)$ (*1* — структурный материал, *2* — порошок); *б* — *1*, *3* — диаграммы сопротивления $\operatorname{tg}\theta = \tau_к/\sigma_к$ соответственно для структурной смеси и порошка, *2*, *4* — диаграммы сопротивления $\operatorname{tg}\theta' = \tau_ф/\sigma_ф$ по фактическим площадкам сдвига соответственно для структурного материала и порошка; *в* — зависимость $\tau_ф$ от $\sigma_ф$ в состоянии предельного равновесия

пытании данного песка в аппаратуре трехосного сжатия. Таким образом, пиковое сопротивление (максимальное $\tau_к/\sigma_к$) определяется не физическими особенностями явления сопротивления грунта сдвигу, а принятой интерпретацией экспериментальных данных. Сопротивление сдвигу сыпучего грунта на фактических поверхностях скольжения монотонно возрастает, имея единственное предельное значение, описываемое законом сухого трения Кулона с постоянным значением угла внутреннего трения $\varphi_к$. Этот факт имеет место и при испытании песков с различной начальной влажностью $W_н$, причем значение $W_н$ влияет на величину β. Опыты при различных значениях $\pm\Delta N$ (в пределах 20—60% от N) дают зависимости $\beta=\beta(u)$, практически совпадающие с зависимостями на рис. 5, *а*.

На рис. 6 приведены результаты испытаний супеси. Экспериментально зафиксировано изменение значения и направления Δu_i от действия положительного $\Delta\sigma_к$. При увеличении u_i до 16 мм характер изменения Δu_i соответствует результату, зафиксированному для песка, т. е. положительные $\Delta\sigma_к$ вызывают отрицательные ΔT и положительные Δu. Дальнейшее увеличение u_i изменяет знак ΔT и Δu на противоположный. При этом возвратно-поступательный характер движения сохраняется. Изменение знака Δu происходит не мгновенно, а требует определенного перемещения u_i, по ходу которого фиксируется участок, где обоймы прибора движутся только поступательно, т. е. $\Delta u=0$ и $\beta=0$. Зависимость $\operatorname{tg}\theta=\tau_к/\sigma_к$ от u_i получена для плотности $\rho=1{,}68$ т/м³ и фиксирует пиковое и остаточное сопротивление (кривая *1* на рис. 6, *в*). Остаточное сопротивление грунта при пульсирующих нагрузках не соответствует результату статических опытов и имеет заниженное значение $\operatorname{tg}\theta=0{,}402$. Кривая *2* иллюстрирует монотонно возрастающую зависимость $\operatorname{tg}\theta'=\tau_ф/\sigma_ф$, полученную пересчетом экспериментальной кривой $\operatorname{tg}\theta=\tau_к/\sigma_к$ с учетом изменения β (стрелками показано перемещение точек). Предельное значение $\operatorname{tg}\theta'$ дает значение $\operatorname{tg}\theta'_{max}=\operatorname{tg}\varphi_к=0{,}454$ ($\varphi_к=24{,}4°$), совпадающее с предельным значением остаточного сопротивления в статических испытаниях, соответствующих диаграмме $\operatorname{tg}\theta=\tau_{к,\,ст}/\sigma_{н.\,ст}$. Характерно, что $\varphi_к=24{,}4°$ было получено для этой же супеси по результатам испытаний в приборе трехосного сжатия. Отсюда следует, что когда пиковое сопротивление на зависимости $\operatorname{tg}\theta=\tau_к/\sigma_к$) не обнаруживается, диаграмму сопротивления грунта по фактическим площадкам сдвига можно считать монотонно возрастающей зависимостью, для которой предельное значение описывается законом сухого трения Кулона при постоянном значении угла внутреннего трения $\varphi_к$.

Результаты экспериментальных исследований структурной гипсовой смеси и смеси нарушенной структуры (порошка) приведены на рис. 7. В опыте со структурной смесью Δu_i изменяется больше, чем в опыте с порошком. Максимальные значения Δu_i соответствуют перемещению обойм прибора на 8—9 мм; характер изменения практически не зависит от структурного состояния материала (рис. 7, *а*). Зависимости сопротивления сдвигу $\operatorname{tg}\theta=\tau_к/\sigma_к$ сильно различаются в области пиковых значений и практически совпадают при достижении остаточного сопротивления сдвигу (рис. 7, *б*). Сопротивление сдвигу смесей по фактическим площадкам скольжения с учетом зафиксированного изменения β показано кривыми *2* и *4*. Характерно, что для порошка диаграмма сопротивления сдвигу $\operatorname{tg}\theta'=\tau_ф/\sigma_ф$ монотонно возрастает, что хорошо согласуется с результатами испытаний песка и супеси. Для структурной смеси зависимость $\operatorname{tg}\theta'$ фиксирует пиковое и остаточное сопротивление сдвигу. В этом случае подтверждается схема Хворслева [7] для определения предельного сопротивления $\operatorname{tg}\theta'=\tau_ф/\sigma_ф$: в пределах структурной прочности ($\sigma_п\approx 1{,}0$ МПа) предельное сопротивление определяется значением сцепления (участок *А* на рис. 7, *в*), при превышении структурной прочности — законом сухого трения Кулона (зависимость *Б* включая пунк-

тир на рис. 7, *в*). Определенный при этом параметр прочности — угол внутреннего трения — имеет постоянное значение $\varphi_к = 30{,}5°$ и не зависит от исходного структурного состояния.

Выводы

1. Экспериментально показано, что конструктивные и фактические плоскости сдвига в срезном приборе при испытании сыпучих и связанных грунтов не совпадают. Угол между этими плоскостями зависит от начальной плотности грунта и других характеристик его физического состояния, а также от перемещения обойм и траектории деформирования. Значение этого угла может быть положительным и отрицательным.

2. Результаты рассмотрения процесса сдвига сыпучих грунтов на фактических поверхностях скольжения не подтверждают существования пикового и остаточного сопротивления сдвигу. Имеет место единственный максимум сопротивления сдвигу, описываемый законом сухого трения Кулона при постоянном значении угла внутреннего трения грунта.

3. Пиковое сопротивление сдвигу грунтов с выраженными структурными связями имеет место и при рассмотрении процесса сдвига на фактических поверхностях. В данном случае пик в сопротивлении сдвигу определяется прочностью структурных связей. Сопротивление сдвигу при развитых пластических деформациях (структурные связи разрушены) определяется законом сухого трения Кулона согласно схеме Хворслева при постоянном значении $\varphi_к$ (зависящем только от вещественного состава грунта) и нулевом значении сцепления.

4. Традиционный метод определения остаточного сопротивления сдвигу может дать значение φ, равное $\varphi_к$, или заниженный результат (что показано на примере определения сопротивления сдвигу супеси).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бишоп А. У.* Параметры прочности при сдвиге ненарушенных и перемятых образцов грунта//Определяющие законы механики грунтов. Механика. Новое в зарубежной науке. М.: Мир, 1975. № 2. С. 7—75.
2. *Крыжановский А. Л.* Механическое поведение грунтов в условиях пространственного напряженного состояния//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983. № 1. С. 23—27.
3. *Крыжановский А. Л., Вильгельм Ю. С., Медведев С. В.* Определение угла трения грунтов в приборах трехосного сжатия и срезных приборах//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1985. № 3. С. 20—23
4. *Крыжановский А. Л., Вильгельм Ю. С., Рахманов Т.* Определение угла трения сыпучих грунтов в трехосной аппаратуре и сдвиговых приборах//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983, № 6. С. 24—27.
5. *Крыжановский А. Л., Рахманов Т., Погосян Р. Г.* А. с. № 1096527 (СССР). Опубл. в Б. И. № 21. 1984.
6. *Цытович Н. А., Крыжановский А. Л., Рахманов Т., Суранкулов Ш. Ж.* Предельное сопротивление сдвигу неводонасыщенных грунтов//Инж. геология. 1983. № 6. С. 3—8.
7. *Hvorslev M. J.* Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden.//Angvidensk, Skr., A, № 45, 1937 (English Trans. № 69-5, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1969).

Московский инженерно-строительный институт

Поступила в редакцию
4.XI.1985

УДК 624.131.1

ЗИАНГИРОВ Р. С., КАЛЬБЕРГЕНОВ Р. Г.

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ

К крупнообломочным грунтам (КОГ) относят три типа грунтов: валунный (глыбовый), галечниковый (щебнистый), гравийный (дресвяный). Виды КОГ целесообразно, как это рекомендуется в работах [2, 9] выделять по соотношению содержания крупнообломочной (частицы размером более 2 мм) и мелкообломочной (менее 2 мм) составляющих КОС, МОС, а также по прочности частиц КОС.

В зависимости от соотношения КОС и МОС выделяется три вида КОГ с заполнителем (глинистый, песчаный и т. п.) или мелкодисперсных грунтов с включениями КОС: 1-й вид — грунт бескаркасный, КОС по массе $<10\%$, по существу, это мелкозернистый грунт (глина, суглинок, песок) с включениями глыб (валунов), щебня (гальки), дресвы (гравия); 2-й вид — КОГ с несовершенным каркасом, КОС по массе от 10 до 65%; 3-й вид — КОГ каркасный, КОС по массе более 65%.

Грунты 1-го вида, как отмечается в работе [2], характеризуются тем, что элементы КОС в них разделены друг от друга мелкоземом; их физико-механические свойства не зависят от содержания КОС до определенного значения плотности. В грунтах 2-го вида наблюдаются контакты между структурными элементами КОС, поэтому свойства таких КОГ с заполнителем будут закономерно изменяться с увеличением содержания КОС или уменьшением содержания МОС. В зависимости от состава заполнителя различают связный КОГ (заполнитель — глина или суглинок) и сыпучий (заполнитель—песок). Грунты 3-го вида характеризуются наличием непосредственных контактов между элементами КОС; свойства КОГ зависят в основном от структуры и состава этого компонента, т. е. от формы и характера поверхности элементов КОС, их прочности и водостойкости, что особенно важно для выветрелых и непрочных пород (аргиллитов, алевролитов и т. п.). Несомненно, что выделенные границы разделения КОГ на 3 вида являются нежесткими и изменяются в зависимости от вида заполнителя, который кроме того, определяет связь их свойств с влажностью. Так, при содержании глинистого заполнителя свойства КОГ с увеличением влажности будут изменяться сильнее, чем при содержании песчаного.

В. И. Федоров [8] предлагает учитывать содержание частиц размером менее и более 2 мм, число пластичности и консистенцию глинистого заполнителя, а также прочность и окатанность частиц размером более 2 мм. Плотность непосредственно не входит в число факторов, определяющих механические свойства КОГ. Физическая картина их деформации слабо изучена. При нагружении деформация грунта происходит как в результате перемещения частиц в новое, более устойчивое положение и деформации самих частиц и их ансамблей (работа «арок»), так и за счет разрушения контактов. Все эти процессы способствуют более плотной упаковке частиц и увеличению числа контактов между ними, что и обусловливает повышение сопротивления сжатию или сдвигу КОГ с ростом давления на него.

Определенный вклад в упрочнение КОГ по мере его деформации, по-видимому, могут вносить механико-химические процессы, возникающие на контактах при смещении частиц относительно друг друга или их разломе, в результате чего эти контакты упрочняются. Очевидно, что деформируемость КОГ зависит от размера зерен, количества и вида мелкозернистого заполнителя, формы крупных обломков и характера их поверхности, прочности обломков, а также от начальной плотности укладки структурных элементов.

Сжимаемости КОГ посвящены различные исследования [1—4, 6]. Так, О. А. Пахомов [6], изучая сжимаемость галечникового грунта с глинистым заполнителем, установил, что она не зависит от содержания КОС при наличии этого компонента менее 20%. С увеличением содержания КОС в диапазоне 20—60% модуль деформации КОГ возрастает и уменьшается при дальнейшем увеличении первого.

Э. М. Добров и др. [2] на дресве гранита с глинистым заполнителем установил, что модуль компрессионной сжимаемости начинает возрастать при содержании КОС более 10% (по массе) до содержания дресвы в 60%; дальнейшее увеличение последнего приводит к резкому росту модуля деформации. Аналогичные результаты были получены Р. Г. Тулиновым [7], В. И. Федоровым [8] и др. Однако они не отмечали столь резкого возрастания модуля деформации, что, очевидно, связано с различием в составе, форме и окатанности частиц КОС и ее прочности на раздавливание. Высокая прочность и угловатость этих частиц при их содержании свыше 60% будет способствовать увеличению модуля деформации.

Интересно отметить, что примерно так же изменяется и плотность упаковки модельных смесей КОГ: наибольшая плотность отмечается при содержании КОС, равном 60% (по массе). По-видимому, при соотношении КОС и МОС 60 : 40 возникают оптимальные условия для плотной упаковки в результате смещения частиц при действии внешнего давления.

Характерная особенность КОГ — неоднородность их гранулометрического состава и наличие крупных структурных элементов, что затрудняет, а часто делает невозможным отбор представительных проб для определения физико-механических свойств. Исследование КОГ в лабораторных условиях осложняется необходимостью использования крупногабаритных установок для соблюдения оптимальных соотношений между размерами обломков и приборов, чтобы исключить влияние отдельных структурных элементов. Это обусловило трудность проведения таких опытов, их малое количество; этим и объясняется отсутствие обоснованных методик оценки физико-механических свойств КОГ и прогноза их изменения в процессе строительства и эксплуатации сооружений.

Для получения достоверных значений деформируемости КОГ необходимо чтобы размеры прибора (высота и диаметр) были больше максимального размера частиц КОГ не менее чем в 5—6 раз.

Известно [5], что деформируемость различных грунтов, в том числе и скелетных (песков), может быть удовлетворительно аппроксимирована степенной зависимостью вида $\varepsilon = aP^{K}$, где ε — относительная деформация; a, K — параметры зависимости. Показатель степени K изменяется в узких пределах: от 0 до 1. В случае $K=1$ имеем упругое, линейно деформируемое тело, а при $K=0$ — тело с постоянной сжимаемостью.

В настоящей статье рассмотрены КОГ главным образом с песчаным заполнителем. Достоверные значения параметров сжимаемости таких грунтов могут быть получены в полевых условиях путем нагружения штампов или на крупногабаритных установках в лабораторных условиях. Однако такие исследования обычно проводятся на ответственных объектах, а для массового строительства обычно ограничиваются ранее

Рис. 1. Схема компрессионного прибора: *1* — цилиндр внешний пликсиглазовый; *2* — станина; *3* — компрессионное кольцо стальное; *4, 5* — штампы; *6* — образец грунта; *7* — шток; *8* — динамометр; *9* — резьбовая стойка; *10* — гайка; *11, 12* — шток и силовой гидроцилиндр с манометром

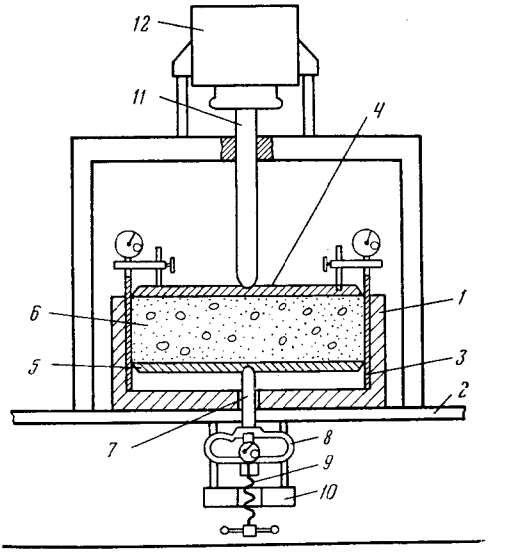


Рис. 1

Рис. 2. Схема стабилометра: *1, 2* — верхний и нижний штамп; *3* — образец грунта; *4* — эластичная оболочка; *5* — пористый штамп; *6* — штуцер; *7* — волюмометр; *8* — манометр; *9* — вакуумный насос; *10* — кожух; *11* — конвективный нагреватель; *12, 13* — волюмометр с поплавком; *14* — шток; *15* — гидроцилиндр, *16* — рама; *17* — редуктор; *18* — опорная плита; *19, 20* — гидронасос с манометром; *21* — груз; *22* — индикатор; *23* — стойка

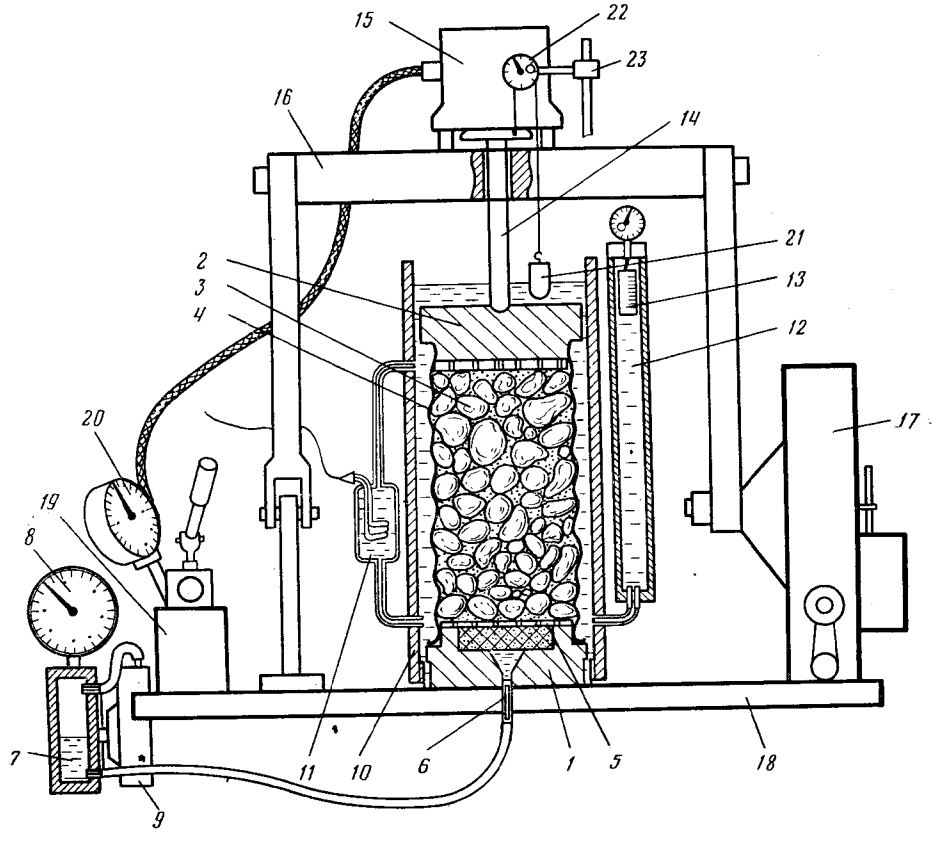


Рис. 2

установленными зависимостями между показателями механических свойств, состава и структуры.

Нами было выполнено несколько серий опытов по определению сжимаемости модельных смесей, состоящих из гальки размером 10—20 мм и песчаного мелкозема с размером частиц менее 2 мм. В 1-й серии опы-

тов определялась сжимаемость смесей КОГ в компрессионных приборах малого размера ($d_{пр}$=8,71 см; $h_{пр}$=3 см); во 2-й серии опытов — в компрессионных приборах большого размера ($d_{пр}$=210 см, $h_{пр}$=10 см). Измерения проводились с замером давления на верхний и нижний штамп, что позволило учесть силы бокового трения (рис. 1). 3-я серия опытов проводилась методом нагружения штампа площадью 2500 см^2 на КОГ, уложенный в котлован. В 4-й серии опытов испытания осуществлялись на приборе трехосного сжатия ($d_{пр}$=12 см, $d_{пр}$=25 см) (рис. 2). Кроме этого была осуществлена статистическая обработка результатов определения модуля деформации КОГ разного генезиса, полученных в экспедициях ПНИИИСа.

Испытания КОГ в компрессионных приборах проводились по следующей схеме: на штамп *4* (рис. 1) ступенями через 0,5 МПа прикладывалась осевая нагрузка; на каждой ступени записывались показания мессур, закрепленных на верхнем штампе, а также мессуры динамометра; каждая ступень нагрузки выдерживалась до наступления условной стабилизации (0,005 мм за 6 мин); после проведения испытания на сжатие осуществлялась разгрузка образца ступенями через 0,05 МПа.

При обработке данных на каждой ступени нагружения определялись:

1) среднее осевое напряжение на образец грунта

$$\sigma_{ср}=(\sigma+\sigma^*)/2,$$

где σ — напряжение на верхнем штампе; σ^* — напряжение на нижнем штампе;

2) деформация образца грунта

$$S=S_1-S_2,$$

где S_1 и S_2 соответственно перемещение верхнего и нижнего штампов под нагрузкой.

Боковое давление вычислялось из соотношения:

$$\sigma_{бок}=\frac{(\sigma-\sigma^*)F_{шт}}{fF_{бок}},$$

где f — коэффициент трения грунта по металлу; $F_{шт}$ — площадь штампа; $F_{бок}$ — площадь боковой поверхности образца.

По результатам испытания грунта на компрессионное сжатие рассчитывался модуль компрессионного сжатия по формуле:

$$E_к=\left(1-\frac{2\mu^2}{1-\mu}\right)\frac{1+e}{a},$$

где a — коэффициент сжимаемости:

$$a=\frac{e_1-e_2}{\Delta\sigma};$$

μ — коэффициент Пуассона:

$$\mu=\frac{\xi}{\xi+1}$$

ξ — коэффициент бокового давления, определяемый по данным испытания, $\xi=\Delta\sigma_{бок}/\Delta\sigma$.

Испытание КОГ в стабилометре заключалось в приложении к образцу ступенчато-возрастающих осевых σ_1 и боковых σ_{2-3} напряжений и определений относительных осевых ε_1 и объемных ε_v деформаций, при этом соотношение σ_1 и σ_{2-3} задавалось с учетом коэффициента бокового распора ξ по формуле $\sigma_1=\sigma_{2-3}/\xi$; $\xi=\mu/(1-\mu)$, где μ — или принимается равным 0,27 (ГОСТ 20276-85), или определяется опытным путем на образце-близнеце.

Для создания каждой ступени нагрузки сначала на образец путем вакуумирования прикладывалось всестороннее объемное напряжение $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$, а затем дополнительное осевое напряжение $\Delta\sigma_1=\sigma_{2-3}/\xi-\sigma_{2-3}$. Осевые ε_1 и объемные ε_v деформации образца от приложенного осевого σ_1 и бокового σ_{2-3} напряжения определялись по индикатору 22 и волюмометру 12 (рис. 2). После затухания этих деформаций на образец прикладывалась следующая нагрузка по аналогичной схеме.

Каждая ступень нагружения выдерживалась во времени до наступления условной стабилизации: по осевым деформациям ΔS_1 не более 0,005 мм за 30 мин, по объемным ΔV — не более 0,1 см³ за 30 мин. Величина ступени по боковым напряжениям составляла 0,01 МПа.

Модуль деформации по трехосным испытаниям на сжатие КОГ рассчитывался по формуле:

$$E=\frac{(\Delta\sigma_1'-\Delta\sigma_{2-3}')(\Delta\sigma_1'+2\Delta\sigma_{2-3}')}{\varepsilon_1\Delta\sigma_1'+\Delta\sigma_{2-3}'(2\varepsilon_1-\varepsilon_v)},$$

где

$\Delta\sigma'_1=\sigma'_1-\sigma^0_1$ — разность осевых напряжений между начальной и конечной ступенями нагрузок;

$\Delta\sigma'_{2-3}=\sigma'_{2-3}-\sigma^0_{2-3}$ — разность боковых напряжений между начальной и конечной ступенями нагрузок;

$\varepsilon_1=\Delta S/H_0$ — относительная осевая деформация;

$\varepsilon_v=\Delta V/V_0$ относительная объемная деформация.

Для получения уравнений зависимости модуля деформации от физических свойств КОГ применялся статистический метод планирования эксперимента, который заключался в том, что испытания на трехосное сжатие проводились по заранее подобранным по схеме модельных смесях, обладающих какими-то оптимальными свойствами. Разработка схемы-матрицы позволила построить стратегию эксперимента таким образом, что на выявление зависимостей требовался минимум испытаний, а сами уравнения связи параметра E с показателями состава, структуры и текстуры КОГ выявлялись в виде полиномной модели. Минимизация количества испытаний осуществлялась за счет оптимального использования всего n-мерного факторного пространства, где одновременно все выбранные факторы (показатели) состава, структуры и текстуры КОГ являются переменными, причем варьирование факторов производилось на ограниченном числе уровней — двух или трех.

При разработке плана эксперимента было выбрано пять факторов, каждый из которых варьировался на двух уровнях $X_{S_{max}}$ и $X_{S_{min}}$. Для оценки применимости линейной модели использовался третий уровень варьирования $X_{s_0}=(X_{S_{min}}+X_{S_{max}})/2$.

Переменные факторы и их уровни изменения следующие:

X_1 — фактор влажности (—1 — воздушно-сухой; +1 — влажный — 0,05 д. е.); X_2 — фактор плотности (—1 — рыхлый — 1,40 г/см³; +1 — плотный — 1,80 г/см³); X_3 — фактор содержания крупных обломков (—1 — 50% крупных обломков — 0,5 д. е.; +1—90% крупных обломков — 0,9 д. е.); X_4 — фактор размера крупных обломков (—1 — фракция гравия 2—10 мм, +1 — фракция гальки 10—20 мм); X_5 — фактор текстуры (—1 — грунт неслоистый; +1 — грунт с прослоем мелкозема, объем прослоя составляет 7,7% объема образца).

В целях изменения количества испытаний для 5-факторного эксперимента на двух уровнях варьирования применялся дробный факторный план, а каждое испытание проводилось с двойной повторностью.

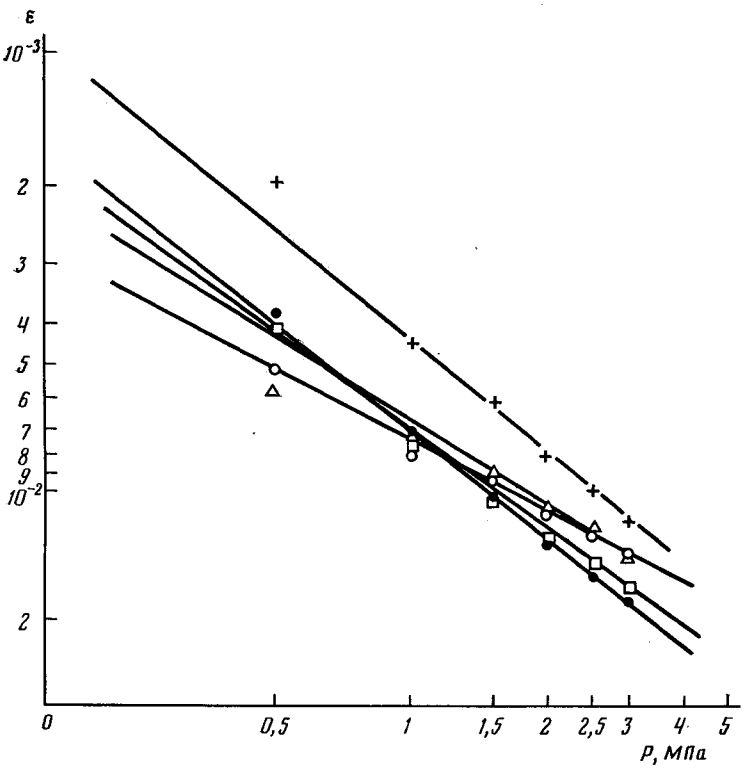


Рис. 3. Зависимость относительной деформации от давления для модельных смесей КОГ

Испытания на трехосное сжатие по матрицам планирования эксперимента, проведенные на модельных смесях КОГ трех генетических типов позволили получить уравнения зависимости модуля деформации от факторов состава, структуры и текстуры КОГ.

Для грунтов элювиального генезиса:

$$F=46{,}63X_2(1+0{,}19X_4)-30{,}38X_1(1+0{,}31X_4-0{,}33X_5)+16{,}5X_3(1+0{,}82X_4)+ \\ +12{,}88X_4+105{,}33 \quad (1)$$

Для грунтов делювиально-пролювиального генезиса:

$$E=103{,}25X_2(1-0{,}36X_1-0{,}2X_3-0{,}38X_5)-62{,}37X_1(1+0{,}72X_4+0{,}47X_5)- \\ -67{,}88X_5(1-0{,}25X_3+0{,}15X_4)-13{,}88X_4(1-5{,}6X_3)+203 \quad (2)$$

Для грунтов аллювиального генезиса:

$$E=184{,}31X_2(1-0{,}1X_3-0{,}23X_5)-59{,}43X_1(1-0{,}08X_3-0{,}25X_4+0{,}53X_5)- \\ -49{,}6X_4(1+3{,}46X_3)-34{,}87X_5+307 \quad (3)$$

При расшифровке каждого фактора применялся алгоритм:

$$\frac{X_S-\overline{X}}{0{,}5(X_{S_{\max}}-X_{S_{\min}})}.$$

На рис. 3 приведена зависимость относительной деформации модельных смесей КОГ от давления по данным компрессионных опытов, из которой следует, что эта зависимость является степенной и имеет вид $\varepsilon=aP^{\kappa}$ в диапазоне давлений от 0 до 0,3 МПа. При этом параметры степенной зависимости изменяются в сравнительно узком диапазоне зна-

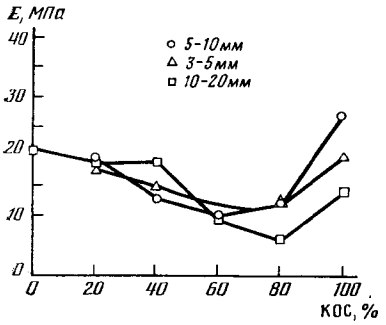


Рис. 4

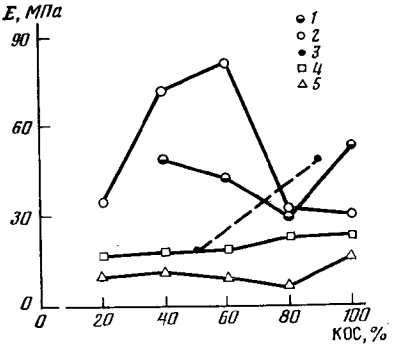


Рис. 5

Рис. 4. Влияние размера КОС модельных смесей КОГ на модуль компрессионной деформации (малый компрессионный прибор)

Рис. 5. Зависимость модуля общей деформации (при $\Delta P = 0{,}1—0{,}3$ МПа) модельных смесей КОГ с песчаным заполнителем от содержания КОС размером 10—20 мм по результатам испытаний различными методами: *1* — штамповые испытания; *2* — прогноз по корреляционному уравнению; *3* — трехосные испытания; *4* — компрессионные испытания с учетом бокового трения; *5* — компрессионные испытания без поправки на боковое трение

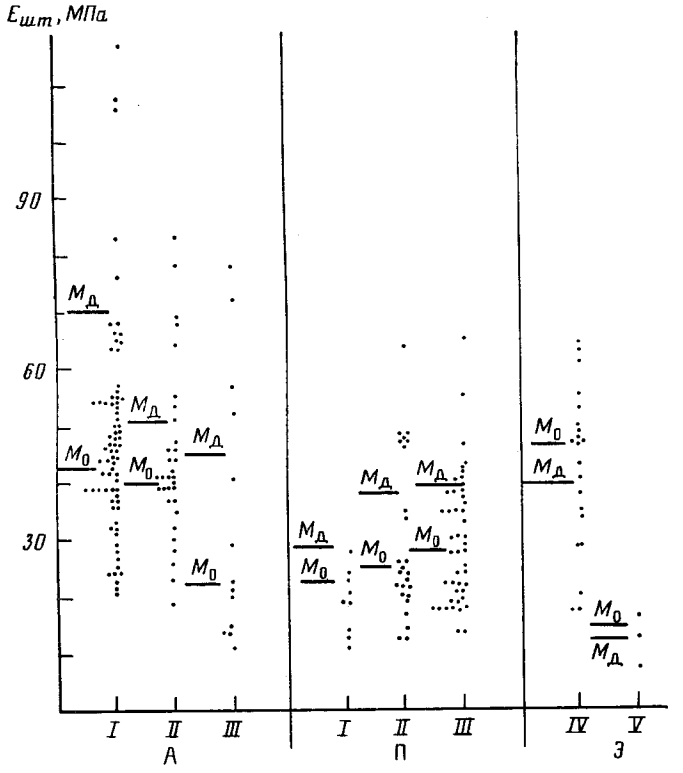


Рис. 6. Графики рассеяния модулей деформации КОГ различных генетических типов: $M_д$ — медианные значения; M_0 — модальные значения; заполнитель I — песчаный, II — супесчаный, III — суглинистый, IV — рухляк, V — сапролит. Диапазон давлений 0,5 МПа. Генезис: А — аллювиальный, П — пролювиальный, Э — элювиальный

Таблица 1

Результаты статистической обработки значений модуля деформаций КОГ по программе для ЭВМ

Группа	Генетический тип КОГ	Состав заполнителя	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции, R	Стандартная ошибка $\sigma_R = \frac{1-R^2}{\sqrt{n}}$	Коэффициент надежности $M = \frac{R}{\sigma_R}$	Частота n
I	Все генетические типы КОГ		$E_ш = 276\,\Sigma_{(>10)} + 532\,\rho_d - 804$	0,70	0,043	16	135
II	Аллювиальный	Песок	$E_ш = 2252\,\rho_d - 4204$	0,81	0,063	12	29
III	То же	Супесь	$E_ш = 636 - 3993\,W$	0,81	0,095	8,5	13
IV	»	Суглинок	$E_ш = 349\,\rho_d + 215\,\rho_{d_m} - 440\,\Sigma_{2-0,05} - 614$	0,93	0,045	20	9
V	Делювиально-пролювиальный	Песок	$E_ш = 840\,\rho_d - 1418$	0,59	0,21	3	10
VI	То же	Супесь	$E_ш = 870\,\rho_d - 1483$	0,58	0,14	4	21
VII	»	Суглинок	$E_ш = 466\,\Sigma_{>10} + 370\,\rho_d - 514$	0,83	0,048	17	41
VIII	Элювиальный (рухляки)		$E_ш = 660 - 1120\,\Sigma_{(>10)}$	—0,70	0,16	—4	10

Примечание. $\Sigma_{(>10)}$; $\Sigma_{2-0,05}$ содержание КОС и МОС размером >10 мм и 2—0,05 мм соответственно; ρ_d — плотность сухого грунта, г/см³; W — влажность грунта, д. е., ρ_{d_m} — плотность сухого заполнителя, г/см³.

чений: параметр a — от $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ до $2{,}2 \cdot 10^{-3}$ (среднее значение $1{,}4 \cdot 10^{-3}$), параметр K от 0,56 до 0,8 (среднее значение 0,71).

Результаты по компрессионной сжимаемости в диапазоне давлений 0—0,3 МПа трех модельных смесей из гравия и гальки с размером частиц 3—5 и 10—20 мм с песчаным мелкоземом приведены на рис. 4. Сложение смесей было плотное, влажность — на уровне гигроскопической. Из приведенных на рис. данных видно, что опыты в малом кольце дают резко заниженные значения модуля деформации при содержании КОС свыше 40%, что объясняется несоблюдением оптимального соотношения между размерами прибора и максимальным размером структурных элементов ($d_{пр}/d_{кос}$=87 мм/15 мм≃6 $h_{пр}/d_{кос}$=30 мм/15 мм=2,0). В опытах с кольцами большого размера $d_{пр}/d_{кос}$=14, $h_{пр}/d_{кос}$=6,7) (рис. 5) наблюдается закономерный рост модуля деформации с увеличением содержания КОС; учет бокового трения позволяет увеличить значения модуля деформации на 20—30%. Результаты этой серии опытов подтверждают опубликованные данные о повышении модуля деформации с ростом содержания КОС в грунте.

В то же время опытами в малом компрессионном приборе установлено, что увеличение содержания КОС в модельной смеси приводит к заметному снижению модуля деформации с 20 до 7—10 МПа, т. е. почти в два раза. Наименьшие значения модуля деформации отмечаются в смесях с содержанием КОС 60—80% (по массе), но для чистого гравия и гальки модуль общей деформации возрастает, при этом у гальки фракции 10—20 он ниже, чем у гравия, что связано, по-видимому, с более легкой дробимостью крупных отдельностей по сравнению с мелкими ча-

Таблица 2

Результаты сравнения рассчитанных ($E_р$) и экспериментально определенных значений ($E_ш$) модулей деформации для КОГ разного генезиса

Генезис и состав	Коэффициент корреляции между $E_ш$ и $E_р$	Уравнение регрессии	Частота, n	Стандарт коэффициента корреляции $\sigma_r=(1-r^2)/\sqrt{n}$	Стандарт зависимой переменной $\sigma_{E_ш}=\sqrt{\Sigma(E_ш-\hat{E}_ш)^2/n}$ МПа	Критические значения критерия при $\beta=0{,}05$ и частоте n	Доверительный интервал $M_E=E_ш\pm t\sigma_{E_ш}$ МПа	Коэффициент надежности $M_r=r/\sigma_r$
Делювиально-пролювиальный с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем	0,903	$\hat{E}_ш=1{,}17E_р-5$	49	0,026	9,94	2,0	$E_ш\pm19{,}88$	34
Делювиально-пролювиальный с песчаным заполнителем	0,95	$\hat{E}_ш=1{,}2E_р-8{,}6$	16	0,024	10,9	2,12	$E_ш\pm17{,}62$	40
Делювиально-пролювиальный с песчаным и супесчаным заполнителем	0,93	$\hat{E}_ш=1{,}2E_р-3{,}7$	34	0,023	8,64	2,04	$E_ш\pm23{,}1$	40,4
Аллювиальный с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем	0,93	$\hat{E}_ш=1{,}06E_р-12{,}5$	49	0,0193	8,33	2,01	$E_ш\pm16{,}7$	48,2
Аллювиальный с песчаным заполнителем	0,95	$\hat{E}_ш=1{,}1E_р-14$	30	0,0178	6,43	2,04	$E_ш\pm13{,}12$	53
Аллювиальный с песчаным и супесчаным заполнителем	0,92	$\hat{E}_ш=1{,}02E_р-9{,}4$	42	0,0237	8,1	2,02	$E_ш\pm16{,}2$	38,8
Элювиальный	0,83	$\hat{E}_ш=2{,}13E_р-5$	10	0,098	10,45	2,23	$E_ш\pm23{,}3$	8,4

стицами. Таким образом, полученные результаты в основном подтверждают результаты опытов [2], свидетельствующие о влиянии на сжимаемость КОГ содержания песчаного мелкозема. Подтверждается также рекомендация СНиП II-15-74 о том, что при содержании КОС<40% ее влияние на свойства КОГ должно слабо проявляться; последние определяются свойствами песчаного мелкозема.

Испытания модельных смесей статическими нагрузками в котловане проводились следующим образом. Котлован размером 2,5×2,5×2 м засыпали песчано-галечниковыми смесями с содержанием крупных обломков 100, 80, 60 и 40% при плотности сухого грунта 1,7—1,8 г/см³. Укладка песчано-галечниковой смеси производилась порциями по 60—100 кг, предварительно галька тщательно перемешивалась с заполните-

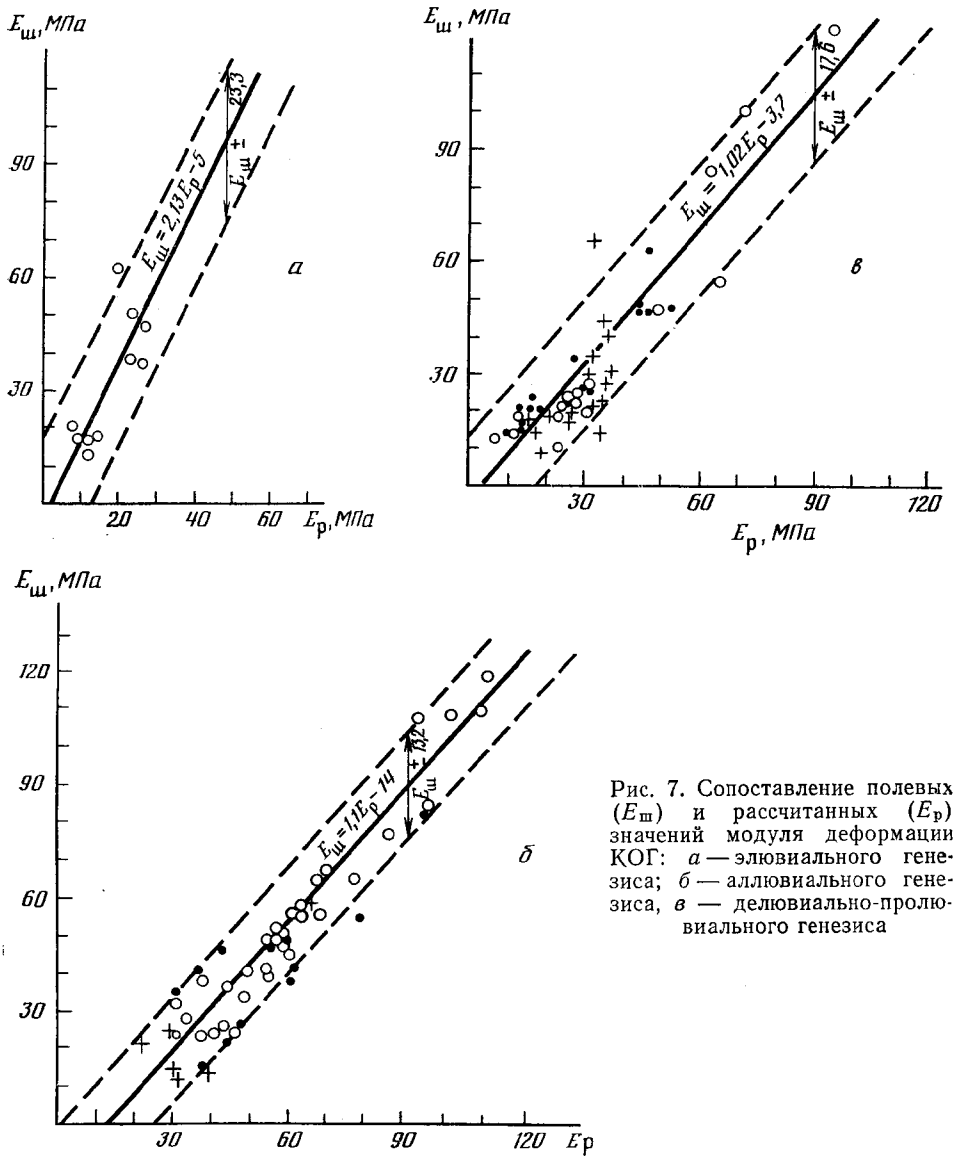


Рис. 7. Сопоставление полевых ($E_ш$) и рассчитанных ($E_р$) значений модуля деформации КОГ: *а* — элювиального генезиса; *б* — аллювиального генезиса, *в* — делювиально-пролювиального генезиса

лем. Необходимая плотность достигалась с помощью послойного трамбования. Исследования показали, что наименьшей сжимаемостью обладают «чистый» галечник при отсутствии мелкозема (E=53,6 МПа) и смесь 40% гальки и 60% мелкозема (E=49,2 МПа). Это объясняется тем, что в первом случае сжимающие напряжения воспринимаются каркасом из крупных обломков, где повороты и проскальзывания частиц друг относительно друга затруднены из-за высокой концентрации напряжения на контактах. Во втором случае сжимающие напряжения воспринимаются мелкоземом с «плавающими» в нем крупными обломками. Деформирование такой смеси затруднено вследствие того, что объем, занятый крупными обломками, мало сжимается.

Увеличение сжимаемости смесей с содержанием мелкозема 40% (E=41,8 МПа) и 20% (E=28,8 МПа) связано с несовершенной каркасной структурой и наличием макропор, не занятых мелкоземом. В этих смесях под действием внешней нагрузки обломки способны переориентироваться, создавая более плотную упаковку.

Графики рассеяния значений модуля деформации КОГ различных генетических типов, по данным полевых испытаний, приведены на рис. 6, из которого видно, что величина модуля деформации аллювиального КОГ изменяется в широких пределах от 11 до 117 МПа в зависимости от вида заполнителя. Так, модальное значение при песчаном заполнителе равно 43 МПа, а при суглинистом — 22 МПа. Значение этого показателя в делювиально-пролювиальных КОГ изменяется от 11 МПа до 65 МПа. При этом состав заполнителя влияет на модальные значения модуля деформации незначительно (E=23 МПа при песчаном заполнителе и E=28 МПа при суглинистом заполнителе). Для элювиальных грунтов получено ограниченное количество значений модуля деформации. Для рухляков E меняется от 18 до 65 МПа (модальное значение 46 МПа), а сапролитов — от 7 до 19 МПа (модальное значение 15 МПа).

Результаты корреляционно-регрессионного анализа результатов определения модуля деформации КОГ при штамповых испытаниях приведены в табл. 1, из которых следует, что величина E в наибольшей степени зависит от плотности сухого грунта и содержания КОС, а в наименьшей мере — от влажности, плотности мелкозема и содержания МОС. Эти данные сравнивались со значениями модулей деформации, рассчитанных по уравнениям, полученным в результате трехосных испытаний модельных смесей КОГ по методике планирования эксперимента. При расчете значений модуля деформаций учитывались факторы состава, структуры и текстуры ($\sum_{КОС}$, $\sum_{<10}$, W, ρ_d, слоистость, ориентация частиц). Результаты этого сравнения приведены в табл. 2 и на рис. 7.

Из приведенных данных видно, что между рассчитанными и экспериментально определенными значениями модулей деформации КОГ существует достаточно тесная связь. Наиболее тесная связь наблюдается для КОГ с песчаным заполнителем; это объясняется тем, что модельные смеси, для которых были получены уравнения (1)—(3), содержали преимущественно песчаный заполнитель.

Выводы

1. Сжимаемость КОГ удовлетворительно аппроксимируется степенной зависимостью вида $\varepsilon = aP^K$. При этом параметр a изменяется для изученных грунтов в пределах $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ до $2{,}2 \cdot 10^{-3}$, а параметр K в пределах 0,56—0,80 при среднем значении 0,71.

2. Величина модуля деформации КОГ, определенная в крупногабаритных компрессионных приборах, зависит от величины бокового трения. Наибольшие значения E получены при полевых испытаниях методом пробных нагрузок; они в среднем вдвое превышают значения модуля деформации тех же самых грунтов, полученных при компрессионных испытаниях с учетом бокового трения образца о стенки кольца.

3. Результаты определения модуля деформации КОГ в приборе трехосного сжатия близки к значениям, полученным при полевых штамповых испытаниях.

4. Сжимаемость КОГ различного генезиса и состава в наибольшей степени зависит от следующих факторов: содержания и размера КОС, плотности упаковки структуры КОГ, влажности и текстуры (наличия слоистости и ориентации частиц КОС).

5. Установлено близкое совпадение экспериментально определенных методом штамповых испытаний значений модуля деформации КОГ со значениями этого показателя, рассчитанными по уравнениям, учитывающим основные факторы состава и структуры КОГ. Такое совпадение позволяет использовать эти уравнения для предварительной оценки сжимаемости КОГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авакян Л. А. и др.* О строительных свойствах крупнообломочных грунтов для земляного варианта высоконапорной плотины Ингури ГЭС//Изв. Тбил. науч.-исслед. ин-та сооружений и гидроэнергетики. Т. 15 (49). Тбилиси: Энергия, 1964. С. 208—212.
2. *Добров Э. М. и др.* Крупнообломочные грунты в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1981. 180 с.
3. *Коган Я. Л.* Сжимаемость крупнообломочных пород под большими нагрузками// Гидротехническое строительство. 1966. № 19. С. 13—15.
4. *Кульчицкий Г. Б.* Экспериментально-теоретические исследования сжимаемости элювиальных крупнообломочных грунтов. Автореф. диссертации канд. геол.-мин. наук. Свердловск, 1965. 25 с.
5. *Лобанов И. З.* Новые данные о сжимаемости песков//Тр. совещ. по инж.-геол. свойствам горных пород и методам их изучения. Т. I. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 135—144.
6. *Пахомов О. А.* Исследования механических свойств окатанного камня в смесях с песчано-гравийным грунтом. М.: Изд-во ВНИИИГ, 1978. С. 12—18.
7. *Тулинов Р. Г.* Методика исследования физико-механических свойств обломочно-глинистых грунтов//Мат. к научно-теорет. конф. ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1968. С. 244—247.
8. *Федоров В. И.* Методика оценки прочности и сжимаемости обломочно-глинистых грунтов//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1984. № 3. С. 18—21.
9. *Шеко А. И.* Классификация щебнисто-глинистых пород по гранулометрическому составу//Тр. совещ. по инж.-геол. свойствам горных пород и методам их изучения. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1956. с. 80—99.

ПНИИИС

Поступила в редакцию
6.XII.1985

ЗАХАРОВ Ю. Ф.

НОВЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОРГАНИЗАЦИИ

Практика строительного и промышленно-хозяйственного освоения территорий со сложными инженерно-геологическими условиями убедительно свидетельствует о необходимости повседневного квалифицированного инженерно-геологического контроля за всеми видами природопользования. Особое значение такой контроль приобретает в Западной Сибири, где продолжает стремительно развиваться главная топливно-энергетическая база страны, создаются уникальные нефтегазопромысловые и нефтегазотранспортные системы. Обустройство месторождений с помощью крупных блочно-комплексных устройств и блок-понтонов, максимальная концентрация промысловых объектов на одной площадке и промысловых коммуникаций в одном коридоре, увеличение числа эксплуатационных скважин в кустах и давления газа в газопроводах, укрупнение установок комплексной подготовки газа и повышение единичной мощности газо- и нефтеперекачивающих агрегатов, максимально возможная автоматизация процессов добычи и транспорта газа и нефти и т. п. — все это обусловливает особенности взаимодействия промышленных объектов с динамичной и уязвимой геологической средой региона.

Западно-Сибирская секция Научного совета АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии и ТюменНИИГипрогаз неоднократно ставили перед директивными органами вопрос о создании в Западно-Сибирском нефтегазовом комплексе службы инженерно-геологического мониторинга. В 1986 г. эти усилия увенчались успехом: в нашей стране впервые организован Трест инженерно-геологического мониторинга, в составе которого предусмотрены две экспедиции и шесть мерзлотно-инженерно-геологических станций. Трест образован Мингазпромом СССР в системе НПО «Тюменьгазтехнология» с целью обеспечения проектной надежности объектов газовой и нефтяной промышленности, защиты и охраны геологической среды от нарушений и загрязнений. Помимо этого треста служба инженерно-геологического мониторинга в Западной Сибири включила также созданную в «ТюменНИИГипрогаз» лабораторию инженерно-геологического мониторинга.

Поскольку отечественная инженерно-геологическая наука недооценивала важности такого вида деятельности, создаваемая служба инженерно-геологического мониторинга не имеет ни научно-методического, ни кадрового обеспечения. В то же время сложность стоящих перед нею задач неизмеримо возрастает с освоением новых регионов Западно-Сибирского нефтегазового комплекса (Ямальского, Тазовского, Гыданского и др.). Одновременно старение действующих объектов добычи и транспорта газа и нефти тоже требует квалифицированного решения связанных с этим проблем.

В первую очередь служба инженерно-геологического мониторинга должна произвести оценку состояния геологической среды действующих объектов газовой промышленности на Тюменском севере, надежность которых недостаточно высока и разработать для них совместно с проектировщиками научно обоснованные превентивные и ремонтно-восстановительные мероприятия (по закреплению грунтовых оснований, усилению фундаментов объектов, защите геологической среды, залечиванию ее опасных повреждений, рекультивации нарушенного природного окружения, регенерации водозаборных и заканчивающих промстоки систем и т. п.). В решении этих задач служба инженерно-геологического мониторинга Западно-Сибирского нефтегазового комплекса рассчитывает на помощь и участие научно-исследовательских институтов и вузов страны, ученых и специалистов.

Научное руководство работами службы инженерно-геологического мониторинга Мингазпром СССР поручил Западно-Сибирской секции Научного совета АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии.

ОБСУЖДАЮТСЯ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ В ОБЛАСТИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

16—19 сентября 1986 г. в Благовещенске состоялась научно-практическая конференция «Инженерно-геологические изыскания в области вечной мерзлоты». Конференция проводилась кафедрой геокриологии МГУ совместно с ПО «Стройизыскания» по планам Научного совета АН СССР по инженерной геологии и гидрогеологии и Научного совета АН СССР по криологии Земли. В ее работе приняли участие 189 специалистов из 23 городов страны, представлявших АН СССР, Мингео, Минвуз, Госстрой, Минэнерго, Минтрансстрой, Минчермет, Минмонтажспецстрой, Минсельхозстрой.

Конференция посвящалась вопросам качества и надежности инженерно-геологических изысканий, которые приобретают особую актуальность в связи с выполнением решений XXVII съезда КПСС, развитием Сибири и освоением зоны БАМа.

Из пленарных докладов наибольший интерес вызвали следующие: «Научные основы инженерно-геологических изысканий в области вечной мерзлоты» С. А. Акинфиева, Э. Д. Ершова и А. И. Левковича «Геокриологическая карта СССР масштаба 1 : 2 500 000» Э. Д. Ершова и К. А. Кондратьева; «Основные требования к инженерно-геологическим изысканиям в криолитозоне» Л. Н. Хрусталева; «Опыт работы и проблемы инженерно-геологических изысканий в зоне Байкало-Амурской магистрали» П. Н. Лугового, А. И. Левковича и др.

На секционных заседаниях рассматривались вопросы методики, нормативной базы, методов и технических средств инженерно-геологических изысканий, инженерно-геокриологического прогноза и охраны природной среды.

На пленарном заседании с отчетами о работе секций выступили А. И. Левкович, К. Г. Пшеничников, С. М. Фотиев, Л. Н. Хрусталев и С. С. Вялов. В их докладах был дан обзор и анализ всем 209 представленным на конференцию докладам и сообщениям, тезисы которых были опубликованы до начала конференции. Изданные материалы представляют собой коллективный отчет о состоянии, уровне и задачах инженерно-геокриологических исследований, которые проводятся в нашей стране.

На конференции отмечался резко возросший за последние годы объем инженерно-геологических изысканий, связанных со строительством и обустройством нефтяных и газовых месторождений, промышленным, гидроэнергетическим, гражданским, линейным строительством в области вечной мерзлоты (Западная Сибирь, зона БАМа, Южно-Якутской территориально-производственный комплекс и др.).

В числе научных достижений была выделена разработка основ и методики ряда новых лабораторных и полевых методов определения состава, строения, физико-механических и теплофизических свойств мерзлых грунтов. На конференции был отмечен высокий процент случаев деформаций зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. Одной из причин подобного положения является недостаточно высокое качество инженерно-геологических изысканий для строительства, во многих случаях не отвечающее нормативному уровню. Не осуществляется в полной мере контроль за надежностью технических решений строительства, принимаемых в проектах, отсутствует инспекция за качеством строительных работ и эксплуатацией зданий. Научные организации недостаточно уделяют внимание практическим вопросам инженерно-геокриологических исследований.

Конференция рекомендовала: вести дальнейшую углубленную разработку научно-методических основ инженерно-геологических изысканий в криолитозоне в целях обеспечения высокого уровня изыскательских и строительных работ; сосредоточить усилия на совершенствовании методики и разработке современных методов и технических средств изысканий в области вечной мерзлоты; развернуть работы по конструированию новых приборов для изучения состава, состояния, строения и свойств мерзлых грунтов; совершенствовать нормативную базу инженерно-геологических изысканий в области вечной мерзлоты.

Ершов Э. Д., Левкович А. И., Трущ Н. И., Шибакова В. С.

СВИРИДОВ В. В.

ПЕРВАЯ МОНОГРАФИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Если познакомиться с учебниками по инженерной геологии, то легко убедиться, что в каждом из них детально описываются инженерно-геологические процессы и явления, даются обширные сведения по геологии, минералогии и петрографии, но очень кратко характеризуются сугубо производственные приложения инженерной геологии.

Монография «Инженерная геология в строительстве» Р. С. Зиангирова, В. С. Быковой и М. П. Полтева (М.: Стройиздат, 1986. 176 с.) перебрасывает столь необходимый «мост» от проблем инженерной геологии к строительному делу. В ее первой главе освещены те вопросы геоморфологии и геологического строения, которые в итоге создают инженерно-геологический фон для любого строительства. Особое внимание авторы монографии уделяют рельефу, прогнозированию его изменений во времени, составлению планов-карт. При характеристике геологического строения затрагивается широкий круг вопросов: тектонические структуры, формы залегания и минералогический состав грунтов, температурный режим. Наличие в монографии схемы тектонического районирования СССР не только будет способствовать правильному естественноисторическому размещению строительных объектов, но и сразу же позволит представить специфику строительных работ, например, необходимость антисейсмических мероприятий.

Во второй главе особое место отводится гидрогеологии района строительства. И это вполне определенно, так как в настоящее время подземные воды из-за сильной застроенности территорий и создания обширных водохранилищ приблизились к земной поверхности со всеми, как говорится, вытекающими отсюда неблагоприятными последствиями. Авторы монографии, стремясь изложить обширный материал, с которым они имеют дело, компактно и наглядно предлагают многочисленные таблицы и карты. В частности, имеются таблица классификации подземных вод и карта их распространения на европейской части СССР, таблица, синтезирующая методы водопонижения. Весьма актуален раздел об агрессивности воды. Обогащаясь в силу разных причин химическими соединениями как на поверхности, так и внутри грунта, вода разрушает материал строительных конструкций.

Глава третья подробно характеризует состав и строительные свойства грунтов с учетом ГОСТа 25100-82 «Грунты. Классификация». Авторы монографии обоснованно указывают для тех или иных видов грунта специфические свойства, наиболее важные при оценке грунтов в качестве оснований зданий и сооружений.

В четвертой главе инженерно-геологические процессы (землетрясения, карст, сели, оползни) систематизируются в виде таблиц, карт распространения. На примерах, пусть даже излишне кратких, этим процессом дается строительная оценка с позиций обеспечения эксплуатационной надежности зданий и сооружений.

В пятой главе монографии изложены вопросы инженерно-геологического районирования, позволяющего предвидеть те конкретные условия, с которыми столкнутся строители в той или иной области нашей страны.

В ней содержится инженерно-геологическое описание самых молодых (четвертичных) грунтов в различных регионах страны. Материалы этой главы, на наш взгляд, окажут серьезную помощь при предварительном назначении типов фундаментов и конструкций подземных сооружений, а также при оценке использования местных грунтов в качестве строительных материалов.

Глава шестая, — последняя в монографии посвящена методике инженерно-геологических изысканий для промышленно-гражданского строительства. В ней впервые отдельно выделяются изыскания для озеленения, газопровода и т. п., а также для зданий

с деформациями и коррозионно активными грунтами. Эту главу, вероятно, можно было бы сделать еще более информативной, раскрыв в ней особенности изыскательских работ в случае линейного, гидротехнического и других видов строительства [1—5].

Рецензируемая монография написана ясным, четким языком и отличается логичностью в изложении всего материала. Ее недостатком служит лишь небольшой формат, что затрудняет чтение карт. Вообще карты лучше было бы поместить на вклейках.

В заключение подчеркну, что монография «Инженерная геология в строительстве» окажет большую помощь инженер-геологам, стремящимся осмыслить практическое назначение полученных ими значений, и инженерам-строителям, использующим инженерно-геологическую документацию, при разработке проектов строительства на современном уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каширский В. А., Липатов Н. С., Орлов Н. М.* Изыскания для строительства сооружений водоснабжения и канализации. М.: Стройиздат, 1971.
2. Инженерно-геологические изыскания для строительства гидротехнических сооружений/Под ред. Карпышева Е. С. М.: Энергия, 1972.
3. *Северьянов Н. Н.* Краткий справочник по изысканиям для линейного строительства. Л.: Стройиздат, 1972.
4. Наставление по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки. М.: Транспорт, 1972.
5. Инженерно-гидрогеологическое обоснование мелиоративного строительства/Под ред. Смирнова Р. А. Киев: Будивельник, 1978.

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»

Руководствуясь решениями XXVII съезда КПСС и Постановлениями ЦК КПСС и Совета Министров СССР об ускорении научно-технического прогресса, учитывая необходимость более тесной связи науки с производством редколлегия журнала «Инженерная геология» приняла решение начать публикацию материалов по научному обоснованию нормативных документов (Гостов, инструкций, рекомендаций), выходящих в нашей стране в области инженерно-геологических изысканий и изучения свойств грунтов.

Редколлегия надеется, что организации и авторы, занимающиеся разработкой и использованием этих документов, будут заинтересованы в таком широком обсуждении и в ближайшее время направят в журнал данные, содержащие теоретические положения, экспериментальные закономерности и обобщения отечественного и зарубежного практического опыта, положенные в основу разрабатываемого или действующего документа. Наиболее содержательные отклики читателей будут опубликованы в порядке дискуссии под рубрикой «Обсуждаем нормативные документы».

Широкое обсуждение научных основ нормативных документов в области инженерно-геологических исследований даст возможность быстрейшей реализации достижений науки в производстве, будет способствовать совершенствованию нормативных документов, позволит повысить качество инженерно-геологических исследований и производительность ведения строительных работ, что в конечном итоге приведет к экономии при возведении нулевых циклов.

Редколлегия

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ «ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИЗУЧЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ДРЕВНИХ СООРУЖЕНИЙ, ПАМЯТНИКОВ И ИСТОРИЧЕСКИХ МЕСТ»

(Атены, Греция, 19—23 сентября 1988 г.)

Греческая национальная группа инженер-геологов сообщает, что 19—23 сентября 1988 г. в г. Атены состоится симпозиум под эгидой Международной ассоциации инженер-геологов (МАИГ), темой которого будет изучение и защита исторического наследия. Предполагается, что тема симпозиума представит интерес для ученых, интересующихся проблемами древних сооружений, памятников и исторических мест, и позволит внести вклад инженерной геологии в решение этих вопросов.

Аннотации докладов необходимо направить в адрес оргкомитета через секцию инженерной геологии Национального комитета геологов СССР.

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

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

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 *Павлова Л. В.*

Сдано в набор 25.02.87 Подписано к печати 27.03.87 Т-05548 Формат бумаги 70×108¹/₁₆
Высокая печать Усл. печ. л. 11,2 Усл. кр.-отт. 26,6 тыс. Уч.-изд. л. 12 Бум. л. 4,0
Тираж 2322 экз. Зак. 4063

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

ЛИТОМОНИТОРИНГ НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КАРЬЕРАХ КМА. *Гальперин А. М., Стрельцов В. И.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

Выделяются зоны геологической среды с учетом специфики объектов, расположенных в пределах горного и земельного отвода горно-добывающих предприятий. Приводится характеристика этапов литомониторинга, вопросы реализации которого рассмотрены на примере прибортового массива карьера Михайловского горно-обогатительного комбината и техногенного массива гидроотвала Лебединского горно-обогатительного комбината. В качестве основных практических результатов применения эффективных методов контроля и прогноза состояния бортовых и отвальных массивов рассматриваются увеличение полноты извлечения железных руд, сокращение объемов вскрышных работ, снижение землеемкости гидроотвала, ускоренная его рекультивация и создание территории горизонтальной планировки на месте овражно-балочных участков. Предлагается использовать опыт литомониторинга в бассейне КМА на карьерах различных горнодобывающих отраслей промышленности.

Рис. 6, табл. 1, библ. 15 назв.

УДК 624.131.31

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАНДШАФТНО-ИНДИКАЦИОННОГО МЕТОДА ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ. *Бондарик Г. К., Кюнтцель В. В., Пендин В. В.* Инженерная геология, 1987, № 3.

Применение ландшафтно-индикационного метода при инженерно-геологических исследованиях требует оценки возможности экстраполяции данных, полученных на эталонных участках, на картируемую площадь. Для этого разработана методика выявления структуры взаимосвязи внешних и внутренних компонентов природно-территориального комплекса (ПТК). Предлагаемая методика предусматривает количественное выражение компонентов ПТК, установление связей между ними с помощью корреляционного и факторного анализа, а также карт сходства.

Методика реализована на территории района лесотундровой зоны севера Западной Сибири. Установлено, что ее мерзлотные условия индицируются комплексными индикаторами, получаемыми на основе множественного корреляционного и последовательного регрессионного анализа.

Данные исследования позволяют оптимизировать состав, размещение и объемы инженерно-геологических съемочных работ.

Рис. 5, табл. 4, библ. 12 назв.

УДК 624.131.1 : 551.49 : 626 : 87

ОСОБЕННОСТИ МЕЛИОРАТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ. *Гавич И. К.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

Анализируются особенности мелиоративных объектов как сложных, экологических, многоуровенных по связям и взаимодействиям природно-техногенных систем, определяются системные принципы их изучения. Формулируются требования к планированию и проведению изысканий, обработке информации, построению вероятностно-детерминированных математических моделей мелиоративных систем с целью долгосрочного направленного регулирования режимом подземных вод и гидрогеолого-мелиоративной обстановкой, обеспечивающего получение максимума товарной продукции при минимальных затратах на освоение и эксплуатацию мелиоративного объекта с учетом сохранения природной среды в заданных ограничениях. Определяются задачи проблемной комиссии по математическим методам в инженерной геологии и гидрогеологии, способствующие успешной реализации программы мелиорации сельскохозяйственных земель.

Библ. 11 назв.

УДК 624.131.43

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД ВОДНОГО ГЕНЕЗИСА. *Комиссарова Н. Н., Коломийцев Н. В.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

Показана определяющая роль процессов набухания в разуплотнении непросадочных и слабопросадочных лёссовых грунтов водного генезиса при переменном увлажнении—высушивании в условиях положительных температур. При набухании идет перераспределение структурных элементов, изменение характера контактов между ними и порового пространства, что приводит к общему разуплотнению породы, увеличению пористости и появлению просадочных свойств. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что формирование просадочности пылеватых образований может происходить и в современных климатических условиях аридной зоны, что особенно важно при оценке инженерно-геологических условий лёссовых территорий.

Рис. 1, табл. 4, библ. 10 назв.

УДК 624.131.41.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАГИ В ЛЁССОВЫХ ГРУНТАХ НА ОРОШАЕМЫХ И НЕОРОШАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ. *Мунир Нажем Абдул, Королев В. А.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

Рассматриваются особенности изменения потенциала (давления) влаги в лёссовых грунтах на орошаемых и неорошаемых территориях дельты р. Акчадарьи. Приводятся экспериментальные результаты определения потенциала влаги исследуемых лёссовых грунтов в зависимости от их влажности при гидратации и дегидратации лёссов. Описывается методика определения потенциала влаги лёссов методом равновесных сред. Анализируется гистерезис потенциала влаги в лёссах при их увлажнении и осушении. Установлено, что процесс длительного орошения территорий приводит к увеличению потенциала влаги лёссов, тогда как для лёссовидных суглинков орошение не вызывает существенного изменения потенциала влаги. Выявленные закономерности изменения потенциала влаги при орошении лёссовых грунтов могут служить основой для прогноза изменения их свойств, в том числе и влагопроводности.

Рис. 1, табл. 1, библ. 10 назв.

УДК 624.131.32

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ПОРОД ПРИ СДВИГЕ В ПОДСТИЛАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЯХ. *Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Гаджиев М. Г.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

В статье рассматривается пример решения задачи о напряженно-деформированном состоянии пород осадочного чехла, залегающих на абсолютно жестком кристаллическом фундаменте, в котором произошло горизонтальное смещение. Для выделенного в пределах верхнего слоя единичного куба приводятся перемещения, происшедшие в нем при сдвиге в подстилающем основании и дается оценка возникающих при этом касательных напряжений, что может быть использовано для исследования возможности и характера разрушения пород верхнего слоя.

Рис. 3, библ. 2 назв.

УДК 624.131.436

ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА КРИОГЕННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД. *Лебеденко Ю. П.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

В работе приводятся новые экспериментальные теоретические разработки по деформированию промерзающих влагонасыщенных дисперсных пород. Показана роль пленочного механизма криогенного деформирования структуры порового пространства, обусловленного течением пленок незамерзшей воды и фазовых переходов. Проведена систематизация типов криогенных структур и вскрыта кинетика их криогенного деформирования.

Табл. 1, рис. 8, библ. 16 назв.

УДК 624.131.41

ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ПРЕДЕЛАХ ТУРГАЙСКОЙ ЛОЖБИНЫ. *Кубринский Р. З.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

В статье приводится сравнительный анализ показателей состава и физико-механических свойств засоленных глинистых грунтов Тургайской ложбины, находящихся в естественном состоянии и подвергнутых диффузному выщелачиванию в дистиллированной воде. Показано направление изменения состояния и свойств грунтов в результате выщелачивания.

Рис. 6, табл. 3, библ. 3 назв.

УДК 624.131.536.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВОДОПОНИЖЕНИЯ. *Гайдин А. М.* «Инженерная геология». 1987, № 3.

Предложен метод прогнозирования провалов поверхности над карстовыми пустотами в сульфатных породах с учетом развития депрессионных воронок. Комплексное использование гидродинамического, геодинамического и аналогового подхода обеспечивает наиболее полный учет природных факторов, обусловливающих вероятность провалов.

Рис. 3, библ. 7 назв.

УДК 624.131.453.

КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ В Г. МОСКВЕ В СВЯЗИ С ЗАДАЧАМИ ИХ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ. *Кюнтцель В. В., Парецкая М. Н., Петренко С. И.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

В статье дана краткая характеристика оползневых участков на территории г. Москвы и рассмотрены причины, вызывающие активизацию оползней. Детально проанализирована инженерно-геологическая обстановка на одном из таких участков и приведены данные режимных наблюдений. В заключение высказан ряд практических рекомендаций.

Рис. 2, библ. 3 назв.

УДК 624.131

ТЕХНОГЕННОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ. *Жигалин А. Д., Локшин Г. П.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

В статье рассмотрено техногенное вибрационное воздействие как один из важных факторов формирования инженерно-геологической обстановки на урбанизированных территориях. Приведены характеристики основных источников воздействия. Показано, что особая роль в формировании техногенного поля вибрации принадлежит транспорту. На основании результатов натурных наблюдений и литературных данных разработаны критерии оценки воздействия на геологическую среду города. В качестве одного из вариантов способа оценки транспортного вибрационного воздействия предложено использование поквадратной оценки территорий на примере модельных участков ряда городов Московской и Ленинградской областей.

Рис. 1, табл. 2, библ. 20 назв.

УДК 624.131.23.1 : 519(477)

ИЗУЧЕНИЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ. *Борейко Л. Г.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

Анализ стратиграфических последовательностей лёссовых пород УССР показал, что они обладают марковскими свойствами. Марковские свойства выявлены посредством анализа чередования типичных лёссов и горизонтов ископаемых почв. В качестве исходных использованы данные М. Ф. Веклича и др. по опор-

ным геологическим разрезам антропогена Украины. Создание вероятностных динамических моделей стратиграфических последовательностей лёссовых пород является удобным средством обобщенного описания и сравнения совокупностей разрезов и может быть использовано на первых этапах инженерно-геологической оценки лёссовых пород.

Табл. 4, библ. 3 назв

УДК 624.131.1

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ. *Зиангиров Р. С., Кальбергенов Р. Г.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

На модельных смесях крупнообломочных грунтов (КОГ) с песчаным заполнителем дана сравнительная оценка сжимаемости КОГ по компрессионным, трехосным и штамповым испытаниям. Установлено, что зависимость сжимаемости КОГ от давления удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией. Наличие бокового трения грунта о кольцо прибора снижает величину модуля деформации. Наибольшие значения модуля деформации КОГ получены при полевых испытаниях методом пробных нагрузок, которые в среднем вдвое превышают значения модуля деформации тех же самых КОГ при компрессионных испытаниях с учетом бокового трения грунта о стенки кольца. Установлено, что основными факторами, определяющими сжимаемость КОГ, являются: содержание и размер крупнообломочной составляющей КОГ, плотность упаковки, влажность и текстура (слоистость и ориентация крупных частиц).

Рис. 7, табл. 2, библ. 9 назв.

УДК 624.131.439.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ТРЕНИЯ В СРЕЗНОМ ПРИБОРЕ. *Крыжановский А. Л., Шеляпин Р. С., Хомяков В. А.* «Инженерная геология», 1987, № 3.

Рассмотрен метод определения ориентации фактической плоскости скольжения при испытании грунта в срезном приборе, которая в общем случае отличается от конструктивной плоскости среза, определяемой плоскостью контакта сдвигаемых обойм. Показано, что процесс сдвига сыпучих грунтов на фактической плоскости характеризуется монотонно возрастающей зависимостью между перемещением сдвигаемых обойм и отношением касательного напряжения к нормальному на указанной площадке. Не подтверждается, таким образом, пиковое сопротивление сдвигу в качестве объективной характеристики механического поведения сыпучих грунтов.

Рис. 7, библ. 7 назв.