

ISSN 0869-7803

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГЕО ЭКОЛОГИЯ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ
ГИДРОГЕОЛОГИЯ
ГЕОКРИОЛОГИЯ

2

1995

ГЕОЭКОЛОГИЯ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ.
ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1979 ГОДА

2 · 1995

(до 1993 г. назывался «Инженерная геология»)

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

март — апрель

МОСКВА «НАУКА»

СОДЕРЖАНИЕ

Макаров В. И., Кюнцель В. В., Авсюк Ю. Н. Энергетика экзогенных геологических процессов 3 X
Варга А. А. Эмпирические классификации скальных массивов 27

Геоэкологические проблемы урбанизированных территорий
Адушкин В. В., Спивак А. А., Овчинников В. М., Соловьев С. П., Спунгин В. Г. Геоэкологический контроль за геофизическими полями мегаполиса 44
Пашковский И. С., Рошаль А. А., Прайнингерова Е., Виттлингерова З. Исследование и моделирование загрязнения подземных вод в районе крупной ТЭЦ в Восточной Чехии 57

Геологическая среда и здоровье человека
Воронов А. Н., Шварц А. А. Новые экологические аспекты оценки качества пресных подземных вод 75

Грунтоведение
Макеева Т. Г., Злочевская Р. И., Трофимов В. А. Закономерности миграции щелочных растворов высоких концентраций в глинистых грунтах 80
Осипов В. И., Филимонов С. Д., Шешенин С. В., Муравлева Л. В. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтоцементной плиты геотехногенного массива 95 X

Природные и природно-техногенные процессы
Рюмин А. Н. Особенности механизма формирования оползня карьера № 3 Прикаспийского горно-металлургического комбината 104 X

Методы и методика исследований
Кожевников Н. О., Никифоров С. П., Сиоников С. В. Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах 118

Дискуссии

Голицын М. С., Островский В. Н., Островский Л. А., Пересунько Д. И. По поводу статьи В. А. Мироненко «О концепции Государственного гидроэкологического мониторинга» («Геоэкология» № 1, 1993 г.)

Краткие сообщения

Суханов А. А., **Ляхович Ф. М.** Компьютеризованный аппаратурно-методический комплекс «Инженерная геофизика»

Люди науки

Сергеев Е. М. О наших коллегах в области инженерной геологии

C O N T E N T S

Makarov V. I., Kyuntzel V. V., Avsyuk Yu. N. Power of exogenous geological processes 3
Varga A. A. Empirical classifications of hard rock masses 27

Geoecological Problems in Urbanized Areas

Adushkin V. V., Spivak A. A., Ovchinnikov V. M., Solovyov S. P., Spungin V. G. Geoecological monitoring of geophysical fields in megapolises 44
Pashkovsky I. S., Roshal A. A., Prainincherova E., Vittlincherova Z. Research and simulation of underground water pollution in the area of a large heat and electric power plant in East Czechia 57

Geoenvironment and Human Health

Voronov A. N., Shvartz A. A. New ecological aspects in estimation of fresh underground water quality 75

Soil and Rock Engineering

Makeeva T. G., Zlochevskaya R. I., Trofimov V. A. Regularities in migration of highly concentrated alkaline solutions in clayey soils 80
Osipov V. I., Filimonov S. D., Sheshenin S. V., Muravleva L. N. Investigation of the stress-strain state of the soil-concrete plate in the geotechnogenic mass 95

Natural and Natural Technogenic Processes

Ryumin A. N. Peculiarities of the formation mechanism of the open-cast landslide at the Pricaspishevsky mining and metallurgical plant 104

Research Methods and Techniques

Kozhevnikov N. O., Nikiforov S. P., Snopkov S. V. Study of the high-speed induced polarization in cryogenic rocks 118
Filippov S. A., Nikolaev A. V., Kovalchuk A. I. Specifics in the development of GISs (geoinformational systems) on the underground and surface waters in the Urals 127

Discussion

Golitsyn M. S., Ostrovsky V. N., Ostrovsky L. A., Peresunko D. I. About the article by V. A. Mironenko «On the concept of the state geoecological monitoring» 133

Brief Communication

Sukhanov A. A., Lyakhovitsky F. M. Computerized methodical complex equipment «Engineering geophysics» 136

People of Science

Sergeev E. M. About our colleagues in engineering geology 139

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

УДК 624.131

© 1995 г. В. И. МАКАРОВ, В. В. КЮНЦЕЛЬ, Ю. Н. АВСЮК

ЭНЕРГЕТИКА ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

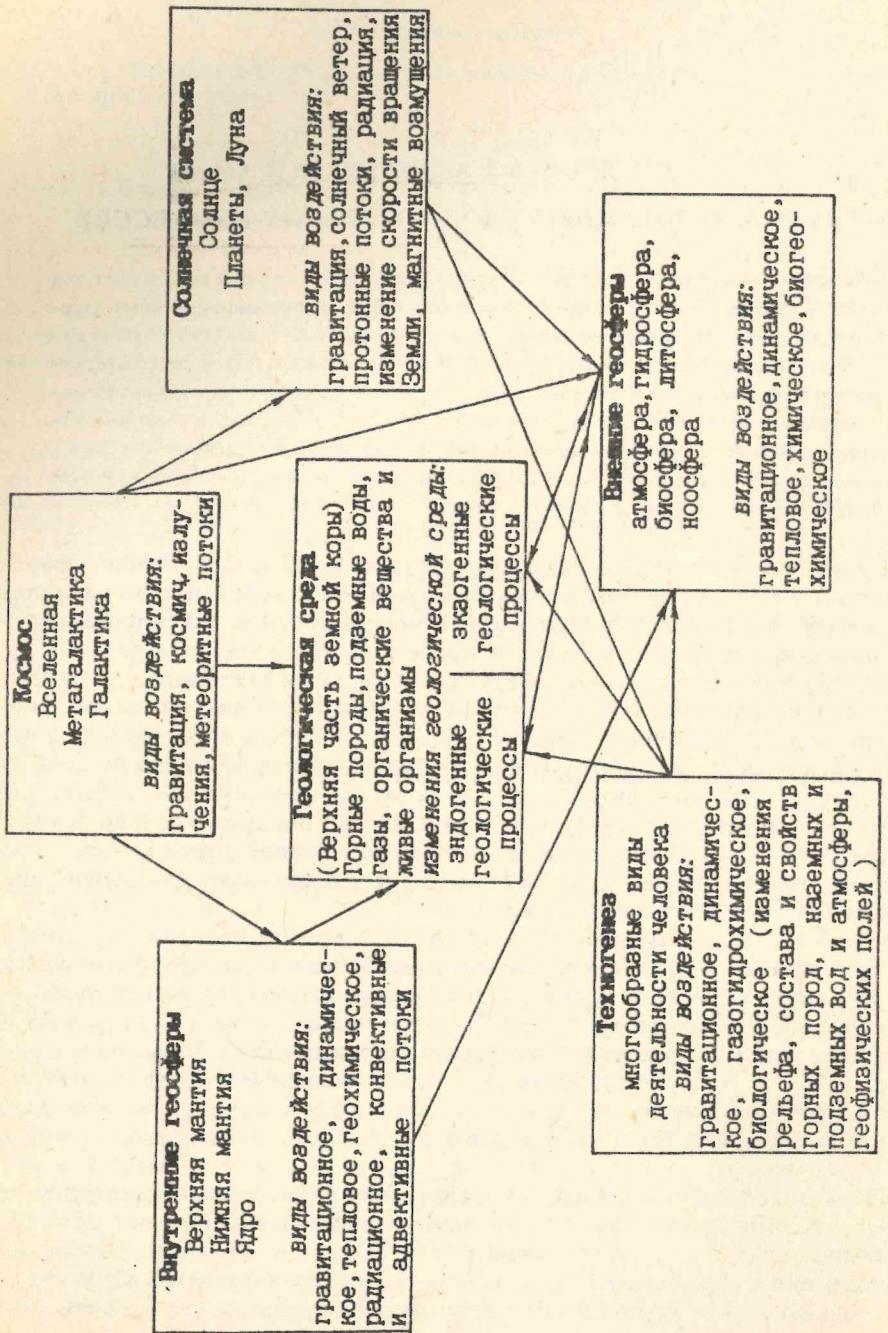
Из большого разнообразия факторов, которые являются причиной и направляют ход экзогенных процессов, предопределяя их особенности и пространственно-временные закономерности, рассмотрены структурно-тектонические и космогенные факторы. На конкретных примерах показано сложное воздействие генетически разнотипных и разнопорядковых структур и процессов на приповерхностные зоны земной коры. Оценивается их отдельный и совокупный вклад в энергетику экзогенных процессов. Сделана попытка выявить вклад космогенных факторов в развитие экзогенных процессов. Методический подход и выполненная на его основе комплексная причинно-энергетическая оценка этих процессов могут быть положены в основу глобального, регионального и локального их мониторинга.

Относя экзогенные геологические процессы (в дальнейшем ЭГП или «экзогенные процессы») к земной поверхности и сравнительно неглубокой приповерхностной зоне земной коры, следует подчеркнуть общезвестное, но принципиально важное положение: земная поверхность представляет собой интегральное геологическое образование, созданное в результате последовательного наложения и сложения разновозрастных вещественно-структурных элементов, закономерно преобразованных комплексом экзогенных процессов. В этом определении земная поверхность выступает, во-первых, как категория историческая и, во-вторых, как результат взаимодействия литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Таким образом, развитие геологических процессов в приповерхностной зоне или слое земной коры управляет разнородными и разнопериодными (разночастотными) процессами, которые характеризуются соответственно различной энергетикой и связаны с различными факторами [24].

Энергетические аспекты проблемы изучения и прогнозирования экзогенных геологических процессов в настоящее время разработаны явно недостаточно, хотя значение их для понимания механизмов ЭГП и действующих на них факторов, а еще более для прогнозирования ЭГП чрезвычайно велико. Для успешного продвижения в этом направлении необходимо прежде всего более четко определить или принять существующие используемые основные понятия, увязать их в единую непротиворечивую систему и составить некую концептуальную схему воздействия на ЭГП внешних и внутренних факторов. Вариант такой схемы дан на рис. 1.

Геологические объекты и процессы, представляющие предмет инженерно-геологических проектов, изысканий и мониторинга, в значительной мере прямо или опосредованно связаны с тектоно-магматическими и другими процессами, происходящими в недрах литосферы на разных ее уровнях, и со структурами, которые созданы этими процессами и трансформированы на ее поверхность, в

* Работа выполнена при финансовой поддержке и по программе проекта 2.3 ГНТП «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф».



зону жизнедеятельности человека. Это — факторы эндогенного ряда. В качестве основных видов энергетических воздействий на земную поверхность, связанных с этим рядом, мы рассматриваем: 1) гравитационные силы; 2) тепловой поток; 3) механические воздействия, связанные с накоплением и разрядкой напряженного состояния, взаимодействиями и деформациями литосферных плит, блоков и слоев земной коры; 4) энергию физико-химических процессов, структурно-вещественных преобразований и течения вещества.

Вторая группа факторов, вносящих энергетический вклад в развитие экзогенных процессов, связана с воздействиями на Землю космических тел (метеоритов, Луны, планет Солнечной системы и прежде всего самого Солнца), космического пространства в целом. Это — внеземные, космические факторы. Основными видами их воздействия на Землю являются: электромагнитное, радиотепловое (свет и тепло), гравитационное, механическое (метеоритная бомбардировка) и радиационное облучение.

Третья группа факторов, энергетический вклад которых в экзогенные процессы необходимо учитывать, связана с ротационными силами Земли. Назовем их планетными факторами. Основными видами их энергетического воздействия являются: инерционные (приливные) силы, изменяющие напряженное состояние и гравитационное поле горных массивов, и магнитное поле.

Четвертая группа факторов, вносящих значительный самостоятельный вклад в энергетику экзогенных процессов, связана с развитием живого вещества планеты, ее биосфера. Их воздействие реализуется через энергию биогеохимических и биофизических процессов и сопровождается выделением тепла или поглощением части эндогенного и космогенного теплового потока, а также изменением весовой нагрузки на поверхность.

В пятую группу энергетических факторов развития экзогенных процессов, которую представляется целесообразным выделять также в качестве самостоятельной, объединены процессы в весьма подвижных сферах Земли — в гидросфере и атмосфере. Их энергетическое воздействие на приповерхностную зону твердой Земли состоит: 1) в изменении гравитационных нагрузок на земную кору; 2) в изменении скорости вращения Земли (и тем самым опять же ее гравитационного поля, напряженного состояния и возможности реализации центробежных сил); 3) в механическом (гидродинамическом) воздействии на земную поверхность и горные массивы и 4) в физико-химических процессах их взаимодействия с горными породами.

Оценивая в целом все вышеуказанные факторы, определяющие ход экзогенных процессов, мы должны свести их энергетику прежде всего и, может быть, главным образом к силам гравитации и тепловому полю. К этому же ряду, хотя и на некотором подчиненном уровне, относится энергия физико-химических, биохимических и биофизических процессов.

Вывод этот достаточно давно известен. Но в таком общем виде он практически не эффективен. Для всякого рода прогностических оценок опасности геологической среды и организации мониторинговых служб необходимо точное знание конкретного вклада весьма многообразных энергетических источников.

Важнейшими аспектами такого анализа и оценок являются: 1) закономерности пространственного распределения и особенностей проявления перечисленных выше энергетических источников (структура энергетического поля земной поверхности) и 2) временной ход или регулярность их проявления (направленность, цикличность, пространственно-временная изменчивость). При этом предполагается многочастотный и многофакторный анализ энергетических спектров.

Наконец, необходим анализ обратных связей между экзогенными геологическими процессами и энергетическими факторами, которые их вызывают. Речь идет о достаточно известном факте влияния экзогенных (в том числе техногенных) процессов на напряженное состояние довольно значительных глубинных объемов литосферы. В данной статье рассматривается лишь та часть модели (схемы), которая характеризует связи ЭГП с воздействующими на них эндогео-

динамическими факторами, а также некоторые проблемы цикличности природных процессов и дискретности геологической среды, в которой они развиваются. В основе находятся следующие основные предпосылки:

1) субстрат, в котором развиваются ЭГП, имеет сложное, неоднородное строение, причем каждая его элементарная ячейка или их совокупности (блоки) находятся в состоянии непрерывных преобразований и разнонаправленных движений;

2) геоблоки различных порядков и разделяющие их разломные (стоковые) зоны, отличающиеся повышенной мобильностью и служащие основными путями теломассоэнергопереноса, являются основными структурными элементами;

3) структура земной коры — продукт сложной эволюции Земли как космического тела и обусловлена изменением параметров поля напряжений и возникновением на различных иерархических уровнях в земной коре зон растяжения и сжатия;

4) формирующиеся геодинамические зоны и создаваемые ими структурные элементы образуют систему иерархического характера. К главнейшим факторам ее формирования относятся вертикальные и горизонтальные эндогенные движения, автоколебательный режим Земли и приливные явления;

5) в верхних горизонтах земной коры тектонофизические явления создают определенное поле напряжений, вызывающих ее деформации и активизацию практических всех категорий экзогенных геологических процессов, в том числе катастрофического характера;

6) размеры и форма структурных элементов определяются дискретностью материальных объектов и связаны с определенными совокупностями вариаций разночастотных колебаний, причем наиболее значительное перераспределение энергии идет в стоковых зонах, которыми могут являться зоны раздела блоков разного порядка, межслоевые каналы, разломы, трещины, определенные формы рельефа;

7) воздействие различных техногенных факторов может резко изменить интенсивность природных ЭГП, но на глобальном уровне не влияет на периодичность их проявления.

Вклад структурно-тектонических и тектономагматических (эндогенных) факторов в энергетику экзогенных геологических процессов

Прежде всего отметим две хорошо известные, но с позиций рассматриваемой проблемы заслуживающие внимания особенности структуры литосферы: 1) расслоение ее на оболочки с разным составом и состоянием вещества в них и с различием процессов преобразования и течения вещества; 2) дискретность, плотностная, вещественно-структурная и реологическая неоднородности земной коры. Такая на сегодняшний день как бы заданная структура, что показал А. В. Лукьянов [17], содержит в себе большой потенциал для развития различных процессов и движений вещества в недрах земной коры и на ее поверхности.

Известно, что влияние структурно-тектонического фактора на экзогенные процессы наиболее ярко проявлено через рельеф Земли и непосредственно через тектонические движения. При этом речь идет исключительно о неотектонических формах и современных движениях, ибо именно они являются активными элементами структуры земной коры и ее рельефа. Все более древние ее элементы пассивно отражают новейшую тектонику, выступая в новой композиции. Они не создают самостоятельных форм рельефа, а лишь предопределяют детали его скульптуры.

Говоря о рельефе земной поверхности в связи с энергетикой экзогенных процессов, мы имеем в виду прежде всего потенциал гравитационной энергии, которым характеризуются все неровности земной поверхности и который приводит в действие широкий комплекс экзогенных процессов (склоновых,

эрозионных, карстовых, суффозионных и т. д.). Этот потенциал является функцией абсолютных и относительных превышений форм рельефа и градиента изменений высот (уклонов поверхности). Вторичными факторами, которые либо усиливают, либо ослабляют эффект гравитационных сил, являются структурно-литологические и другие особенности субстрата (геологической среды) и климатические условия.

Можно утверждать a priori, что при однотипном рельефе, но при разной литологии и в различающихся климатических условиях склоновые процессы (например, обвалы и оползни) будут характеризоваться различной частотой и кинетической энергией, которые можно, по крайней мере для отдельных территорий, считать и моделировать.

Следует ожидать, что потенциальная гравитационная энергия рельефа в определенной мере изменяется под воздействием внешних гравитационных сил (луно-солнечного притяжения), а также изменения скорости вращения Земли. Эти слабые вариации при определенных условиях («подготовленность» склоновых масс) могут, вероятно, оказаться «последней каплей», выступать в роли спускового крючка. Поэтому, например, учет изменений скорости вращения Земли в сезонном или других циклах следовало бы ввести в прогнозные и мониторинговые системы наблюдений и синоптические документы для территорий, опасных в отношении оползней, обвалов, селей, горных ударов, выбросов и т. д.

Необходимо отметить, что энергетический фактор рельефа является производной ряда глубинных процессов, а именно: магматизма, метаморфизма, течения вещества глубинных слоев литосферы и тектонических деформаций. Порознь или во взаимодействии и/или некоторой соподчиненности друг с другом они деформируют земную поверхность, создавая первичные (тектонические) формы рельефа и тем самым включая механизм ее экзогенного расчленения и образования множества вторичных форм. Таким образом, первичные энергетические источники, реализуемые через рельеф Земли, связаны с физико-химическими процессами преобразования и пространственного перераспределения (изменения объема и перемещения) глубинного вещества, теплом и энергией механического взаимодействия и деформаций литосферных плит, блоков и слоев. Очевидно, что на все эти процессы определенное влияние оказывают ротационный режим, глобальное и региональное поле силы тяжести. К сожалению, такую иерархически сложную и генетически многокомпонентную энергетическую систему в целом мы можем характеризовать пока лишь качественным описанием. Количественные модели возможно рассчитывать лишь для отдельных компонентов этой системы, например для изостатических процессов [4].

Вместе с тем даже качественная оценка рассматриваемых глубинных (первичных) энергетических факторов, управляющих экзогенными процессами, необходима, особенно с точки зрения долговременного прогноза этих процессов. Дело в том, что достоверное знание направленности и стадии развития глубинных процессов в том или ином регионе позволяет быть уверенным в тенденциях развития рельефа в целом и отдельных его форм и, следовательно, предвидеть тенденцию усиления или ослабления гравитационных и других процессов на склонах рельефа.

Так, например, ослабление или прекращение тектонических поднятий земной коры позволяет строить модели развития склонов по исходящему типу, т. е. допускать их последовательное выполаживание, снижение и другие особенности, которые в целом увеличивают их устойчивость. Активизация же процессов поднятий предполагает иную прогностическую модель — восходящий тип развития склоновых процессов, в которой значительно больше неопределенностей и альтернативных вариантов. Эти примеры прямым образом связаны с другим фактором активного тектонического воздействия на склоны — сейсмическими ударами. Оценка сейсмической опасности (энергии сейсмического воздействия) и характера этого воздействия в первом и втором случае будет весьма различной, хотя морфология и структура горных массивов в силу инерции рельефообразующих процес-

сов могут оставаться достаточно сходными. В первом случае сейсмическая опасность будет существенно меньшей, чем во втором.

Еще более ярко рассматриваемая проблема (первостепенность глубинных источников энергии и необходимость учета тенденций и тектонической эволюции территории) иллюстрируется тремя катастрофическими землетрясениями на равнинной территории Центральных Кызылкумов, где процессы орогенеза находятся еще в начальной стадии (по крайней мере, с геоморфологической точки зрения) и конечно же должны учитываться в любых инженерно-геологических проектах [5, 19, 21].

Проблема связи экзогенных процессов с энергией магматических процессов кажется относительно простой. Здесь мы можем анализировать воздействие тепла, специфическое и аномально высокое химическое воздействие (связанное с пневмогидротермальным выносом в приповерхностные слои глубинного вещества) и механическое воздействие (в виде вулкано-тектонических и тектоно-магматических деформаций земной коры и аккумулятивных вулканических форм).

При проектировании, сооружении и эксплуатации различного рода инженерных сооружений (особенно объектов повышенной опасности, АЭС, ГЭС и др.), при горных разработках и при оценке опасности территорий особое внимание привлекают зоны разломов и высокой трещиноватости. Проанализируем в рассматриваемом аспекте эти формы тектонической структуры. Разлом можно определить как зону высоких градиентов изменения характеристик геологических структур и форм рельефа, их пространственного положения, свойств и т. д. с нарушением их непрерывности. Но при этом мы должны, очевидно, ограничиться только активными (ныне живущими или, по крайней мере, неотектоническими) разрывами. Все более древние (мертвые) разрывы являются по существу такими же элементами неоднородной среды, как все другие контакты (стратиграфические, литологические, интрузивные и т. д.).

Самостоятельная энергетическая роль разломов является производной напряженного состояния геологической среды и приложенных к ней сил (природа их может быть различной и здесь не обсуждается). Она (эта роль) связана с движением по разлому и вещественно-структурными преобразованиями горных пород, слагающих внутреннюю зону разлома и его крылья (речь идет о дроблении, истирании, минеральном преобразовании, динамометаморфизме и т. д.). Этому способствует повышенная проницаемость зоны разлома для флюидов, газов и тепла, которые, взаимодействуя с материнскими породами крыльев разлома, создают нередко особую геохимическую обстановку, реализующуюся соответствующим образом. Одна из типичных моделей разлома представлена на рис. 2. К разлому целесообразно относить и зону его динамического влияния, которая сама по себе неоднородна и состоит из нескольких подзон с различными свойствами. В результате всего разломы становятся зонами наиболее активного и глубокого выветривания и других экзогенных процессов, резко ослабляют горные массивы.

Движения по разломам создают более или менее значительные тектонические уступы, которые в силу своей крутизны (высокие градиенты) обладают повышенной гравитационной неустойчивостью. Это может усугубляться сейсмогенностью этих движений, вызывающих сейсмические удары. Статистические связи между магнитудами землетрясений, длиной разломов, амплитудами сейсмогенерирующих подвижек по ним и ряда других параметров сейсмологами изучены, хотя некоторые проблемы здесь все же сохраняются [2].

Важным элементом оценки опасности зон разломов для инженерно-геологических объектов и их влияния на экзогенные процессы является их морфологический и кинематический тип. В этом отношении разломы растяжения (сбросы, сбросо-сдвиги и соответствующая им трещиноватость, проницаемость) резко отличаются от разломов сжатия (надвигов, взбросов, взбросо-сдвигов) и сдвига. Они характеризуются совершенно различными полями напряжений, иным строением и шириной зоны динамического влияния в крыльях разлома, различной напряженностью в разных крыльях и другими особенностями (рис. 3).

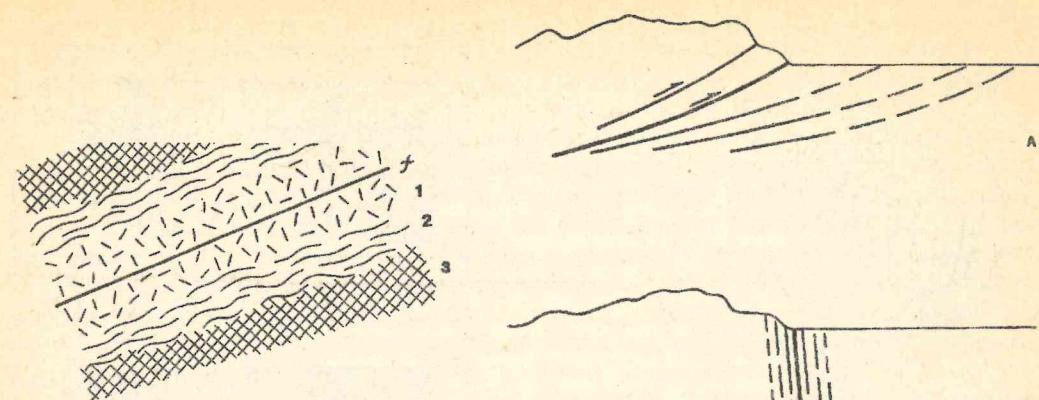


Рис. 2

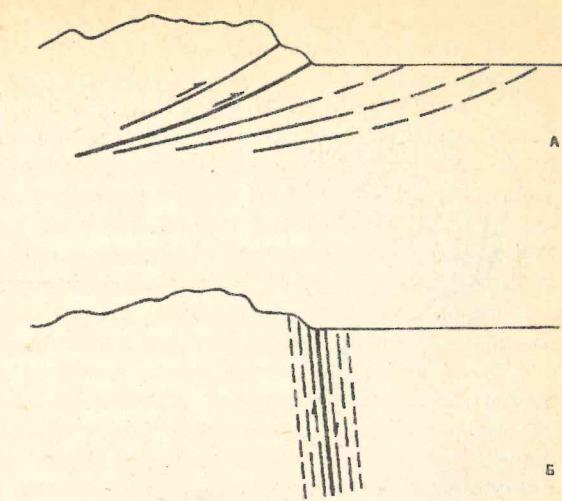


Рис. 3

Рис. 2. Принципиальная схема строения зоны тектонического разлома: f — плоскость основного сместителя; 1 — подзона механического разрушения (высокой трещиноватости, оперяющих разрывов, дробления, расслаивания, истирания и других преобразований массивов горных пород); 2 — подзона пластических деформаций (изгиба и динамометаморфических преобразований горных пород); 3 — ненарушенный массив

Рис. 3. Принципиальная схема асимметричного (А) и симметричного (Б) строения зон динамического влияния разломов (в зависимости от морфологического и кинематического их типа)

Рассматривая влияние разломов на экзогенные процессы, нельзя не отметить особый класс этих структурных образований, который объединяется под названием планетарной трещиноватости [31]. Огромная статистика полевых наблюдений и аналитических построений, но особенно космические изображения земной поверхности показали со всей очевидностью, что закономерно ориентированные относительно оси вращения Земли трещины или линеаменты разных порядков (от локальных до глобальных) являются непременным элементом всех без исключения континентов Земли. Преобладающим большинством исследователей их происхождение связывается с ротационными напряжениями неравномерно вращающейся Земли (рис. 4). Эти повсеместно распространенные трещины, не будучи на первый взгляд заметными элементами структуры земной коры, играют в ней большую роль. Во-первых, они обеспечивают пластику земной коры, ее реакцию на вариации скорости вращения, прецессии и нутации оси вращения. Во-вторых, будучи в той или иной мере ослабленными линиями, они преломляют в некоторой мере пространственное положение тектонических структурных элементов («тектоника вышивает свои узоры на канве планетарной трещиноватости», как сформулировано С. С. Шульцем [30]). Вместе с тем необходимо предполагать, что сама планетарная трещиноватость в какой-то мере использует уже существующие неоднородности тектонической структуры.

В-третьих, что в данном контексте особенно важно, планетарная трещиноватость локализует и ориентирует в пространстве различного рода физиографические особенности земной поверхности или, что то же самое, развитие экзогенных процессов. Это проявляется в удивительной геометризации эрозионных сетей, контуров морских берегов, озер и даже болот, почвенно-растительного покрова, линейной организации карстовых и суффозионных провалов, а также других форм и явлений. На такую пространственную упорядоченность, линейную организацию геологических и ландшафтно-геоморфологических объектов или их элементов, на их приорченность к некоторым часто незримым

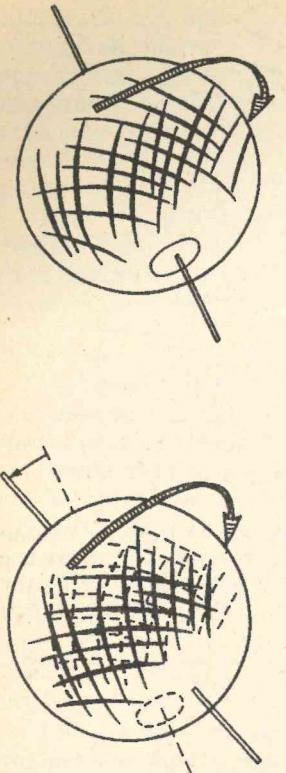


Рис. 4

Рис. 4. Схема развития планетарной трещиноватости в результате вращения Земли (по Д. Вертцу [39] со ссылкой на эксперименты Г. Кнетша). А — растрескивание воскового покрова шара в результате его вращения; В — заложение новой системы трещин (сплошные линии) при изменении положения оси вращения или перемещения континентов (ось вращения и трещины прежней генерации обозначены пунктиром)

Рис. 5. Принципиальная схема положения разломов в разрезе земной коры и их отражения на земной поверхности и на космических изображениях в виде линеаментов. А, Б — скрытые (не достигающие земной поверхности) разломы, прерывающиеся на больших (1) и меньших (2) глубинах в разрезе земной коры (а) и в плане, на космическом изображении (б); В — открытые (достигающие земной поверхности) разломы с наклонным (1) и вертикальным (2) положением плоскости (зоны) смещения в разрезе (а) и в плане, на космическом изображении (б): 1 — разломы; 2 — блоки земной коры, разделяемые разломами; 3 — слои земной коры, не затронутые непосредственно разломами; 4 — возможные варианты механических смещений по разломам; 5 — конус рассеяния механических деформаций (вторичных деформаций); 6 — неравномерный восходящий поток глубинных флюидов, газов, тепла; 7 — конус рассеяния потока флюидов, газов, тепла; 8 — условная кривая величины теплового потока над зоной разлома; 9 — условная интенсивность аномалий на дневной поверхности, связанных с разломами и определяющих яркость и морфологию проявления линеаментов на космических изображениях

линиям или направлениям впервые обратил особое внимание В. Хоббс [36], который назвал такие линии-направления линеаментами.

И в-четвертых, линеаменты, представляя относительно ослабленные зоны земной коры, являются линиями истечения глубинных флюидов, газов и тепла, которые формируют соответствующий геохимический фон и могут предопределять некоторые особенности линейных зон выветривания и почвенно-растительного покрова. При этом речь может идти не только о разрывах и зонах трещиноватости, достигающих непосредственно земной поверхности, но и о погребенных нарушениях скрытого типа (рис. 5) [20, 21].

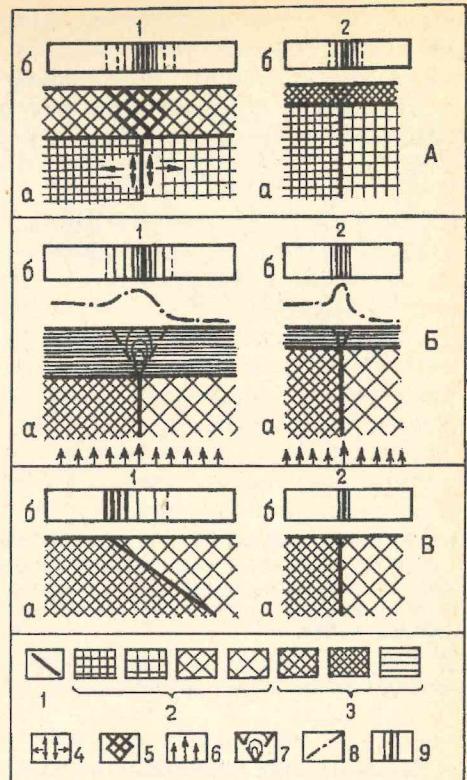


Рис. 5

Таким образом, разрывные нарушения, строго говоря, являются важным, но вторичным фактором, выполняя роль проводника и трансформатора первичных энергетических источников. Вращение же Земли и изменение скорости ее вращения являются одними из первичных факторов трещино- и разломообразования, преломленных определенным образом в экзогенных процессах.

Рассматривая структурно-тектонические факторы, определяющие энергетику экзогенных процессов, нельзя не остановиться на существовании обратных связей и необходимости их учета. Обратимся в связи с этим к ставшему классическим примеру озера Бонневиль в Северной Америке, плейстоценовые террасы которого, как показал Г. Джильберт [35], после высыхания озера были деформированы в результате куполообразного изостатического поднятия. Аналогичный процесс (со всеми вытекающими отсюда последствиями в характере и направленности экзогенных процессов) мы должны предполагать для обширной территории Аральского моря, уровень которого за последние 10—15 лет упал более чем на 10 м.

Основной причиной этого падения, по мнению большинства исследователей, является резкое сокращение поступления вод Амудары и Сырдарьи, не компенсирующего масштабы испарения. Однако нельзя исключать другие причины аральской катастрофы. В числе таковых могут быть климатические изменения во всем Памиро-Тянь-Шаньском регионе и на примыкающих равнинах, а также влияние тектонических деформаций в бассейне Араля. Последние могут вызвать значительное перераспределение подземного стока, роль которого, возможно, недооценивается.

Не умаляя масштабов техногенного влияния на сток рек и возможных последствий этого влияния, нельзя не вспомнить, что в сравнительно недавней истории Араля существовало время, когда Амударья, крупнейшая питательная артерия Араля, не впадала в него и уходила не на север, а далеко на запад, неся свои воды к Каспию. Более молодые ($Q_3^2 - Q_4$) террасы нынешнего северного участка долины Амудары свидетельствуют также о неоднократных изменениях уровня моря и/или об изменении водности Амудары, которые происходили независимо от деятельности первобытного человека. Сходное по амплитуде падение уровня воды, также начиная с 60-х годов, происходит на озере Чад по причине почти исключительно климатической, поскольку влияние деятельности человека на изменения речного стока там чрезвычайно мало [16].

В связи с этим напомним также значительное сходство колебаний уровней Каспия [8] и Большого Соленого озера (реликта оз. Бонневиль) в Северной Америке [32]. Последнее резкое падение Каспия началось в 1933 г., а второго озера — в 1925 г. и достигло некоторого промежуточного минимума соответственно в 1940—1941 ($-\Delta h = 1,7$ м) и в 1935—41 гг. ($-\Delta h \approx 3$ м). Начиная с 1977 г. в первом случае и с 1982 г. во втором происходит катастрофический подъем уровня.

Мы отнюдь не связываем единой причиной события на Арале и оз. Чад, на Каспии и Большом Соленом озере. Тем не менее они дают основание разделять выводы о том, что первопричиной этих колебаний являются климатические изменения [6, 8, 14, 32].

К этому следует добавить некоторые соображения о возможном вкладе структурно-тектонического фактора. В своем нижнем течении Амударья преодолевает Карабаур-Султануиздагскую зону четвертичных поднятий северо-западного простирания, которая является звеном весьма протяженного «вала Карпинского». Амплитуды молодых деформаций земной коры здесь незначительны, и этот выступ при высоком стоянии уровня воды в море не является серьезной преградой для мощной реки. Но при снижении уровня моря и уменьшении водности реки значение этой преграды может увеличиться (рис. 6). Здесь мы имеем случай существенного изменения роли одного фактора под влиянием другого, который генетически с первым не связан.

Высокая сейсмичность в близлежащем районе Центральных Кызылкумов, которая проявилась Газлийскими разрушительными землетрясениями 1976 и

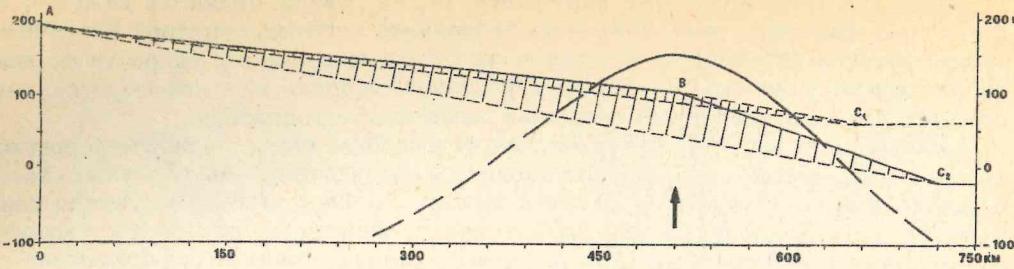


Рис. 6. Принципиальная схема изменения эрозионного потенциала и подземного стока Амударьи в зависимости от тектонического порога и уровня Аральского моря. C_1 и C_2 — уровень моря до и после падения; $A B C_1$ и $A B C_2$ — русло Амударьи до и после падения уровня моря; $A B C_1 A$ и $A B C_2 A$ — зоны эрозионного потенциала Амударьи до и после падения уровня моря. Жирная кривая со стрелкой обозначают Карабаур-Султануздагское тектоническое поднятие.

1984 гг., и ряд других геолого-геоморфологических и геофизических признаков свидетельствуют достаточно однозначно о современной тектонической активизации этой части Туранской плиты под влиянием процессов, происходящих в соседнем Тянь-Шане [19]. Поэтому представляется, что современные тектонические деформации земной коры Кызылкумов и Южного Приаралья могут вызвать изменение режима и направленности поверхностного и подземного стока вод в Аральское море и внести свой вклад в катастрофу. Сложение же этих деформаций с изостатическим поднятием коры под Араком позволяет считать эту область территорией повышенного геологического и сейсмического риска.

Таким образом, Аральское море и Приаралье являются примерами сложных причинно-следственных взаимозависимостей между экзогенными и эндогенными процессами различной природы, которые необходимо и возможно заложить в прогностическую модель или модели (сценарии) развития окружающей среды, а вопрос о причинах падения уровня Аральского моря вряд ли можно считать окончательно решенным.

Тибетское плато иллюстрирует эффект крупномасштабных, панрегиональных и глобальных изменений окружающей среды и характера экзогенных и эндогенных процессов, вызванных совместным влиянием тектонических и ротационных планетных сил. Гигантский по своим размерам мощный блок континентальной коры ($2500 \times 1200 \times 70$ км) представляет высочайшее на Земле поднятие. По последним данным китайских и других геологов, которые были продемонстрированы на XIII Конгрессе ИНКВА [37], это поднятие возникло в течение чрезвычайно малого отрезка времени — в основном за последние 1,5—2 млн. лет. Это привело к нарушению движения воздушных масс, в том числе южных влажных муссонов, и крупномасштабным климатическим, топографическим и геоморфологическим изменениям, которые сформировали принципиально новую экзодинамическую структуру на обширнейшей территории Центральной Азии в четвертичном периоде.

В последние годы в качестве основной причины поднятия Тибетского нагорья чаще всего называют коллизию Индийской и Евразиатской литосферных плит и с нею связывают соответственно основные энергетические источники такой деформации литосферы.

Сравнительный анализ глубинной структуры новейших орогенов Центральной Азии показывает, что само по себе латеральное сжатие земной коры обеспечивает существующие особенности верхнекоровой и глубинной структур лишь частично; весьма значительная роль принадлежит процессам преобразования (разуплотнения) и перемещения вещества в верхней мантии и в низах земной коры этих областей [18]. Сейчас важно подчеркнуть также то обстоятельство, что такой гигантский выступ литосферы на теле врачающейся Земли должен испы-

тывать и воздействие мощных кариолисовых сил, смещаясь под их влиянием в горизонтальном направлении.

Таким образом, энергетика поднятия, горизонтального смещения, гетерогенных деформаций Тибетского плато и его воздействия на соседние блоки и всю ореклиматическую ситуацию региона предопределена по крайней мере тремя в значительной степени независимыми причинами, которые, как следует предполагать, характеризуются своими закономерностями проявления.

Важное значение при оценке энергетики и прогноза ЭГП имеет пространственная и временная дискретность геологической среды [9]. Пространственная дискретность выражается в разделении земной коры на отдельности различных иерархических уровней, причем параметры геоблоков соседних порядков соотносятся между собой в интервалах от 2 до 5, в среднем 3,5. Справедливость такого утверждения для ЭГП, обусловленных активными нарушениями, доказана Е. И. Селюковым [27] на примере оползней Южного берега Крыма. Им выделены несколько рангов оползней, тесно связанных с разрывными нарушениями и геоструктурами различных порядков. Подобные закономерности наблюдаются в районах карстовых провалов и трещин, которые проявляются в полном соответствии с дискретными свойствами геологической среды [14].

Однако этот вопрос не столь однозначен. Существуют и иные оценки дискретности геологической среды. Например, В. Немец и Р. Квет [26] дискретность разрывных структур определили формулой $y_x = 2^{-x}D$, где y — расстояние между разрывами (линеаментами) одного порядка, x — порядок разрывов (линеаментов), D — диаметр Земли.

Предлагались и другие эмпирические зависимости. Однако все они не вошли в геологическую практику. Главной причиной таких неудач является интегральный подход к изучению дискретности разрывов, линеаментов, блоков и других структурных форм. Несомненно, что их, как геологические образования, следует считать дифференцированными по времени возникновения и развития, по глубине заложения и природе (тектонические разрывы, планетарная трещиноватость и т. д.), по морфологии и генетическому типу (разломы растяжения, сжатия, сдвига). Кроме того, необходимо строгое, основанное не на формальном, а на системном подходе разделение структурных форм на ранги (порядки).

Еще хуже, к сожалению, изучена временная дискретность геологических процессов и структур, выражаящаяся в повторяемости, ритмичности и цикличности их развития. Самыми известными ее проявлениями являются слоистость осадочных пород, ряды разновозрастных террас, ледниковых образований и т. п. Выявление этой закономерности и ее причин (а это прямое отношение к энергетике геологических процессов!) имеет не только теоретическое, но еще более практическое значение. Так, повторяемость землетрясений — один из краеугольных камней оценки сейсмической опасности территорий и сейсмического районирования. По этому поводу предложены различные эмпирические формулы, которые, однако, не раскрывают сущности процесса, механизма накопления и разрядки напряжений. Это объясняется очевидной недостаточностью статистических данных, особенно касающихся сильных землетрясений, и оторванностью этих данных от особенностей геологической среды и эволюции ее структуры.

Значительно более длительные ряды данных о сильных сейсмических событиях зафиксированы в геологических разрезах и формах рельефа. Их изучение позволило В. Г. Трифонову определить повторяемость сильных землетрясений в зонах Таласо-Ферганского разлома на Тянь-Шане и ряда разломов в Монголии за последние 100 тыс. лет, т. е. за поздний плейстоцен — голоцен [22, 28]. Интервалы между сильными землетрясениями, отмеченными импульсными смещениями по разломам, в разных зонах оказались довольно различными (от 230 до 800 лет). Таким образом, этот метод также свидетельствует об изменчивости условий и длительности накопления напряжений и их сейсмической разрядки.

Следует также заметить, что как сейсмостатистических, так и сейсмогеологических данных недостаточно для однозначных выводов о ритмичности сейсмогенных разрядок, которые могли быть связаны с некоторыми планетарными периодическими процессами и по поводу регулирующей роли которых высказано немало предположений.

Временные ряды проявлений оползней и других склоновых гравитационных процессов в различных областях Земли

В классе ЭГП с рассматриваемой точки зрения наиболее изученным следует считать лишь оползневые и селевые процессы. Для отдельных типов механизма оползневых процессов составлены схемы их полных циклов с выделением отдельных стадий и фаз [15, 25]. При изучении массовых проявлений оползней на европейской территории СНГ установлены ряды георитмов или циклов 2-го рода, которые обычно подразделяются на многовековые, вековые и внутривековые.

Из числа многовековых циклов особая роль в развитии всех геологических процессов в течение голоцена (последние 10—12 тыс. лет) принадлежат циклу средней продолжительностью около 1850 лет (цикл Шнитникова). Анализ влияния этого цикла на развитие гравитационных склоновых процессов, в том числе оползней, показал, что оно было весьма значительным, хотя существенно различным в разные фазы данного цикла.

Наряду с этим выделяются циклы продолжительностью 900, 600, 300 и 180 лет. В ходе развития оползней и обвалов заметно влияние субвековых циклов порядка 80—90 лет и особенно цикла продолжительностью около 60 лет, связанного с воздействием ротационных сил. Среди внутривековых наиболее значимы оползневые циклы продолжительностью около 30, 22, 11 и 9 лет, а также более мелкие, включая 2—3-летние и годовой [11, 12].

Механизмы, ими управляющие, не всегда хорошо исследованы и устанавливаются чаще всего на гипотетическом уровне. Представляется, однако, что связи ЭГП с солнечной активностью и приливными явлениями, вызванными воздействием на все земные сферы Солнца, Луны и других планет Солнечной системы, должны проявляться. Попытка оценки таких связей делается ниже.

В современной литературе фактические данные по оползневым и другим гравитационным склоновым процессам разбросаны по многочисленным источникам и, как правило, не систематизированы. Значительная часть этих данных не опубликована и также рассеяна по различным отчетам, хранящимся в государственных и территориальных фондах. Исключение представляет лишь основательная сводка М. Шпурека [38]. Однако эта работа почти недоступна и на русский язык не переведена. К тому же в ней содержится очень мало сведений об оползнях Восточной Европы и вообще по территории бывшего СССР. Поэтому наряду с материалами М. Шпурека В. В. Кюнцелем использованы собственные сборы и обобщения, которые выполнялись им в течение нескольких последних десятилетий.

Проведенные исследования позволяют строить временные ряды проявлений оползней как по отдельным сравнительно небольшим участкам и регионам, так и по крупным территориям земного шара. С этой целью было составлено и проанализировано несколько временных рядов обвально-оползневой активности. Первый из них охватывает область Альпийской горно-складчатой системы (Европейские Альпы). Здесь использованы данные по проявлениям оползней и крупных обвалов в течение 1866—1970 гг., которые заимствованы из работы М. Шпурека без существенных дополнений. В качестве основного показателя принято число отдельных оползней и обвалов, произошедших в течение одного года (табл. 1).

Такой временной ряд представляется нам достаточно надежным, особенно с конца XIX столетия, и в основном правильно отражает катастрофические проявления гравитационных процессов на данной территории. Возможно, некоторое

Временной ряд проявлений оползней в Альпийской горно-складчатой системе (Альпы) с 1866 по 1970 г.

| Год | Число оползней |
|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|
| 1866 | 6 | 1892 | 16 | 1918 | 2 | 1944 | 12 |
| 1867 | 10 | 1893 | 12 | 1919 | 10 | 1945 | 8 |
| 1868 | 15 | 1894 | 9 | 1920 | 14 | 1946 | 4 |
| 1869 | 11 | 1895 | 28 | 1921 | 3 | 1947 | 3 |
| 1870 | 8 | 1896 | 24 | 1922 | 12 | 1948 | 6 |
| 1871 | 4 | 1897 | 29 | 1923 | 11 | 1949 | 6 |
| 1872 | 15 | 1898 | 34 | 1924 | 26 | 1950 | 8 |
| 1873 | 4 | 1899 | 22 | 1925 | 18 | 1951 | 24 |
| 1874 | 12 | 1900 | 80 | 1926 | 46 | 1952 | 22 |
| 1875 | 9 | 1901 | 29 | 1927 | 22 | 1953 | 22 |
| 1876 | 17 | 1902 | 27 | 1928 | 31 | 1954 | 17 |
| 1877 | 9 | 1903 | 29 | 1929 | 18 | 1955 | 42 |
| 1878 | 9 | 1904 | 22 | 1930 | 23 | 1956 | 52 |
| 1879 | 15 | 1905 | 47 | 1931 | 46 | 1957 | 29 |
| 1880 | 14 | 1906 | 18 | 1932 | 28 | 1958 | 48 |
| 1881 | 8 | 1907 | 32 | 1933 | 18 | 1959 | 52 |
| 1882 | 23 | 1908 | 10 | 1934 | 10 | 1960 | 71 |
| 1883 | 10 | 1909 | 5 | 1935 | 14 | 1961 | 54 |
| 1884 | 15 | 1910 | 9 | 1936 | 14 | 1962 | 45 |
| 1885 | 20 | 1911 | 20 | 1937 | 11 | 1963 | 68 |
| 1886 | 12 | 1912 | 4 | 1938 | 13 | 1964 | 38 |
| 1887 | 14 | 1913 | 26 | 1939 | 34 | 1965 | 67 |
| 1888 | 19 | 1914 | 23 | 1940 | 19 | 1966 | 22 |
| 1889 | 13 | 1915 | 25 | 1941 | 33 | 1967 | 19 |
| 1890 | 12 | 1916 | 20 | 1942 | 9 | 1968 | 2 |
| 1891 | 9 | 1917 | 7 | 1943 | 7 | 1969 | 14 |
| | | | | | | 1970 | 29 |

исключение представляют годы мировых войн и других больших потрясений, когда служба наблюдений за режимом геологических процессов по понятным причинам ослаблялась.

Второй временной ряд учитывает оползнеобразование в пределах Восточно-Европейской платформы и прилегающих к ней частей Альпийского складчатого пояса (Карпаты, Крым, Кавказ) (табл. 2, 3). Анализируются отдельные крупные оползни или массовые активности различных их генетических типов в интервале 1855—1987 гг. Основной показатель — число оползней (точнее, оползневых катастроф) за один год. Однако в ряде случаев указаны месяцы или сезоны массовой активизации оползней в течение года. При этом следует учитывать, что подобные активизации, обычно катастрофического характера, охватывают не всю изучаемую территорию, а лишь отдельные районы, в каждом случае разные.

Недостатком данного временного ряда является следующее: неравная его представительность по годам; возможные проблемы в периоды войны, революций и прочих социальных катаклизмов; возможно, не следовало бы объединять оползни на платформе и в горно-складчатых зонах, но в данном случае это

Временной ряд проявлений оползней на Восточно-Европейской платформе и примыкающих к ней частях Альпийского складчатого пояса с 1855 по 1987 г.

Таблица 2

| Год | Число проявлений | Время массовых активизаций | Год | Число проявлений | Время массовых активизаций | Год | Число проявлений | Время массовых активизаций | Год | Число проявлений | Время массовых активизаций |
|------|------------------|----------------------------|------|------------------|----------------------------|------|------------------|----------------------------|------|------------------|----------------------------|
| 1855 | 3 | | 1888 | 8 | Март | 1921 | 1 | | 1954 | 52 | Январь, февраль, весна |
| 1856 | 1 | | 1889 | 3 | | 1922 | 2 | | 1955 | 44 | Весна |
| 1857 | 0 | | 1890 | 0 | | 1923 | 11 | | 1956 | 44 | Весна |
| 1858 | 2 | | 1891 | 3 | | 1924 | 31 | Апрель | 1957 | 36 | |
| 1859 | 4 | | 1892 | 5 | | 1925 | 7 | | 1958 | 36 | |
| 1860 | 1 | | 1893 | 3 | | 1926 | 15 | | 1959 | 43 | Весна, ноябрь |
| 1861 | 3 | | 1894 | 6 | | 1927 | 8 | | 1960 | 80 | Март, апрель |
| 1862 | 2 | | 1895 | 7 | | 1928 | 3 | | 1961 | 66 | Февраль, июнь |
| 1863 | 0 | | 1896 | 4 | | 1929 | 3 | | 1962 | 34 | |
| 1864 | 0 | | 1897 | 8 | Март, сентябрь | 1930 | 1 | | 1963 | 53 | Весна |
| 1865 | 1 | | | | | 1931 | 3 | | 1964 | 28 | |
| 1866 | 3 | | 1898 | 2 | | 1932 | 9 | | 1965 | 27 | |
| 1867 | 2 | | 1899 | 2 | | 1933 | 11 | Октябрь | 1966 | 57 | |
| 1868 | 1 | | 1900 | 7 | | 1934 | 8 | | 1967 | 22 | |
| 1869 | 1 | | 1901 | 2 | | 1935 | 10 | | 1968 | 26 | |
| 1870 | 0 | | 1902 | 5 | | 1936 | 16 | | 1969 | 22 | |
| 1871 | 0 | Весна | 1903 | 2 | | 1937 | 13 | | 1970 | 33 | Весна |

Таблица 2 (окончание)

| Год | Число проявлений | Время массовых активизаций | Год | Число проявлений | Время массовых активизаций | Год | Число проявлений | Время массовых активизаций | Год | Число проявлений | Время массовых активизаций |
|------|------------------|----------------------------|------|------------------|----------------------------|------|------------------|----------------------------|------|------------------|----------------------------|
| 1872 | 0 | | 1904 | 3 | | 1938 | 14 | | 1971 | 23 | |
| 1873 | 0 | | 1905 | 17 | Апрель, октябрь, ноябрь | 1939 | 15 | Весна, октябрь | 1972 | 17 | |
| 1874 | 1 | | | | | 1940 | 24 | | 1973 | 17 | |
| 1875 | 0 | | 1906 | 17 | Февраль, март | 1941 | 14 | Февраль, март, май | 1974 | 32 | Весна |
| 1876 | 0 | | | | | 1942 | 5 | | 1975 | 37 | Март, апрель |
| 1877 | 8 | Апрель | 1907 | 11 | Март, апрель | 1943 | 9 | Весна | 1976 | 4 | |
| 1878 | 0 | | | | | 1944 | 6 | | 1977 | 14 | |
| 1879 | 6 | Апрель | | | | 1945 | 17 | | 1978 | 23 | Январь, февраль, весна |
| 1880 | 2 | | 1908 | 6 | | 1946 | 15 | | 1979 | 21 | Апрель, весна |
| 1881 | 1 | | 1909 | 2 | | 1947 | 14 | | 1980 | 12 | |
| 1882 | 3 | | 1910 | 4 | | 1948 | 17 | | 1981 | 14 | |
| 1883 | 1 | | 1911 | 3 | | 1949 | 22 | | 1982 | 1 | |
| 1884 | 7 | | 1912 | 12 | Май | 1950 | 23 | | 1983 | 0 | |
| 1885 | 2 | | 1913 | 6 | | 1951 | 30 | | 1984 | 0 | |
| 1886 | 1 | | 1914 | 6 | | 1952 | 125 | Весна | 1985 | 10 | Июнь, июль |
| 1887 | 4 | | 1915 | 23 | Март, апрель | 1953 | 76 | Март, весна | 1986 | 2 | |
| | | | | | | | | | 1987 | 7 | |
| | | | | | | | | | | | |
| 1916 | 9 | | 1917 | 1 | | | | | | | |
| | | | 1918 | 6 | | | | | | | |
| | | | 1919 | 0 | | | | | | | |
| | | | 1920 | 3 | | | | | | | |

Таблица 4

Временной ряд проявлений оползней в Западной Европе с 1894 по 1980 гг.

Таблица 3

Временной ряд проявлений оползней в отдельных регионах Восточной Европы (1 — Одесса, 2 — Киев, 3 — Волгоград (Царицын))

| Год | Число оползней | | | Год | Число оползней | | | Год | Число оползней | | |
|------|----------------|----|---|------|----------------|----|---|------|----------------|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 |
| 1884 | 3 | 2 | — | 1914 | 0 | 1 | 0 | 1944 | 0 | 1 | 0 |
| 1885 | 0 | 0 | — | 1915 | 3 | 11 | 0 | 1945 | 3 | 1 | 0 |
| 1886 | 1 | 0 | — | 1916 | 0 | 6 | 0 | 1946 | 4 | 0 | 2 |
| 1887 | 1 | 1 | — | 1917 | 0 | 0 | 0 | 1947 | 1 | 1 | 4 |
| 1888 | 0 | 5 | — | 1918 | 5 | 0 | 0 | 1948 | 5 | 0 | 5 |
| 1889 | 0 | 0 | — | 1919 | 0 | 0 | 0 | 1949 | 4 | 1 | 5 |
| 1890 | 0 | 0 | — | 1920 | 0 | 0 | 0 | 1950 | 5 | 0 | 1 |
| 1891 | 1 | 2 | — | 1921 | 0 | 0 | 0 | 1951 | 4 | 0 | 1 |
| 1892 | 1 | 2 | — | 1922 | 0 | 0 | 0 | 1952 | 1 | 0 | 2 |
| 1893 | 1 | 0 | — | 1923 | 1 | 1 | 0 | 1953 | 4 | 0 | 2 |
| 1894 | 2 | 2 | — | 1924 | 1 | 23 | 0 | 1954 | 5 | 0 | 4 |
| 1895 | 0 | 7 | — | 1925 | 1 | 0 | 0 | 1955 | 6 | 0 | 10 |
| 1896 | 0 | 1 | — | 1926 | 0 | 2 | 2 | 1956 | 3 | 0 | 12 |
| 1897 | 2 | 3 | — | 1927 | 0 | 2 | 1 | 1957 | 1 | 0 | 9 |
| 1898 | 1 | 0 | — | 1928 | 0 | 0 | 0 | 1958 | 3 | 0 | 11 |
| 1899 | 0 | 1 | — | 1929 | 0 | 0 | 0 | 1959 | 6 | 0 | 11 |
| 1900 | 1 | 2 | 1 | 1930 | 0 | 0 | 0 | 1960 | 3 | 0 | 10 |
| 1901 | 0 | 1 | 0 | 1931 | 0 | 0 | 0 | 1961 | 3 | 0 | 23 |
| 1902 | 0 | 0 | 0 | 1932 | 3 | 0 | 0 | 1962 | 2 | 0 | 14 |
| 1903 | 0 | 1 | 0 | 1933 | 1 | 0 | 0 | 1963 | 2 | 0 | 13 |
| 1904 | 1 | 1 | 0 | 1934 | 1 | 0 | 0 | 1964 | 1 | 0 | 2 |
| 1905 | 1 | 15 | 0 | 1935 | 2 | 0 | 0 | 1965 | 1 | 0 | 6 |
| 1906 | 0 | 12 | 0 | 1936 | 2 | 1 | 2 | 1966 | 1 | 0 | 10 |
| 1907 | 0 | 6 | 0 | 1937 | 1 | 0 | 2 | 1967 | 2 | 0 | 4 |
| 1908 | 0 | 0 | 0 | 1938 | 1 | 0 | 4 | 1968 | 4 | 0 | 0 |
| 1909 | 0 | 0 | 0 | 1939 | 0 | 2 | 3 | 1969 | 2 | 0 | 1 |
| 1910 | 1 | 1 | 0 | 1940 | 1 | 1 | 2 | 1970 | 3 | 0 | 0 |
| 1011 | 0 | 1 | 0 | 1941 | 2 | 1 | 2 | 1971 | 0 | 0 | 1 |
| 1912 | 5 | 0 | 1 | 1942 | 0 | 0 | 1 | 1972 | | | |
| 1913 | 0 | 0 | 1 | 1943 | 0 | 0 | 0 | 1973 | | | |

Осуществлены
ПРОТИВООПОЛЗНЕ-
ВЫЕ мероприятия

сделано вполне осознанно, чтобы увеличить число значений и выявить то общее, что содержится в разных областях.

Как уже было сказано, данные неравноценны и по числу проявлений, и по эффекту их экологического воздействия. В некоторых случаях при отдельных массовых активизациях в движение приходят десятки, сотни, а иногда и тысячи относительно небольших оползней. Учесть их все пока не представляется возможным. В данном случае учитывались лишь те проявления, для которых имелись географические привязки и временные датировки с точностью не более одного года. Именно благодаря большой детализации произошло заметное увеличение амплитуды оползневых проявлений в некоторые годы, особенно в 1952 г., когда весною действительно происходила массовая активизация оползней на Черноморском побережье Кавказа и в других регионах. Однако все эти недочеты трудно

| Год | Число оползней | Год | Число оползней | Год | Число оползней |
|------|----------------|------|----------------|------|----------------|
| 1894 | 4 | 1923 | 9 | 1952 | 12 |
| 1895 | 13 | 1924 | 12 | 1953 | 16 |
| 1896 | 21 | 1925 | 10 | 1954 | 10 |
| 1897 | 23 | 1926 | 34 | 1955 | 25 |
| 1898 | 29 | 1927 | 14 | 1956 | 29 |
| 1899 | 18 | 1928 | 15 | 1957 | 21 |
| 1900 | 69 | 1929 | 9 | 1958 | 34 |
| 1901 | 18 | 1930 | 14 | 1959 | 40 |
| 1902 | 24 | 1931 | 25 | 1960 | 47 |
| 1903 | 27 | 1932 | 9 | 1961 | 29 |
| 1904 | 17 | 1933 | 8 | 1962 | 23 |
| 1905 | 22 | 1934 | 5 | 1963 | 34 |
| 1906 | 4 | 1935 | 8 | 1964 | 11 |
| 1907 | 18 | 1936 | 11 | 1965 | 48 |
| 1908 | 4 | 1937 | 9 | 1966 | 17 |
| 1909 | 4 | 1938 | 8 | 1967 | 20 |
| 1910 | 12 | 1939 | 29 | 1968 | 8 |
| 1911 | 15 | 1940 | 17 | 1969 | 19 |
| 1912 | 2 | 1941 | 26 | 1970 | 22 |
| 1913 | 15 | 1942 | 6 | 1971 | 5 |
| 1914 | 16 | 1943 | 2 | 1972 | 7 |
| 1915 | 10 | 1944 | 9 | 1973 | 4 |
| 1916 | 9 | 1945 | 5 | 1974 | 4 |
| 1917 | 7 | 1946 | 2 | 1975 | 3 |
| 1918 | 1 | 1947 | 1 | 1976 | 3 |
| 1919 | 9 | 1948 | 2 | 1977 | 5 |
| 1920 | 7 | 1949 | 3 | 1978 | 4 |
| 1921 | 1 | 1950 | 6 | 1979 | 1 |
| 1922 | 8 | 1951 | 19 | 1980 | 4 |

устранимы и, по нашему мнению, слабо влияют на представительность данного временного ряда, вследствие чего он может успешно использоваться для дальнейшего анализа.

Более представительный ряд проявлений оползневых процессов на территории Западной Европы ограничен временным диапазоном 1894—1980 гг. (табл. 4, 5; рис. 7). По ряду параметров он сопоставим не только с временным рядом гравитационных процессов в Альпах, но и с временным рядом оползней Восточной Европы, построенным по независимым данным. Сопоставление проявлений оползней в отдельных регионах Западной и Восточной Европы также подтверждает большее сходство их режимов, что трудно считать случайным. В общей совокупности все эти материалы позволяют достаточно определенно судить о временных закономерностях развития оползней на изучаемой территории.

Даже предварительное ознакомление с построенными временными рядами

Таблица 5

Временной ряд проявлений оползней в отдельных регионах Западной Европы (1 — Италия, 2 — Швейцария, 3 — Чехословакия)

| Год | Число оползней | | | Год | Число оползней | | | Год | Число оползней | | |
|------|----------------|---|----|------|----------------|---|----|------|----------------|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 |
| 1890 | 5 | 0 | 0 | 1920 | 0 | 0 | 3 | 1950 | 1 | 1 | 0 |
| 1891 | 1 | 1 | 0 | 1921 | 0 | 0 | 0 | 1951 | 3 | 5 | 1 |
| 1892 | 5 | 0 | 4 | 1922 | 0 | 0 | 3 | 1952 | 2 | 2 | 0 |
| 1893 | 3 | 0 | 0 | 1923 | 0 | 2 | 2 | 1953 | 0 | 1 | 3 |
| 1894 | 4 | 0 | 0 | 1924 | 2 | 1 | 1 | 1954 | 3 | 0 | 0 |
| 1895 | 9 | 0 | 3 | 1925 | 2 | 1 | 1 | 1955 | 2 | 6 | 2 |
| 1896 | 16 | 2 | 0 | 1926 | 2 | 1 | 17 | 1956 | 6 | 5 | 1 |
| 1897 | 9 | 2 | 6 | 1927 | 1 | 3 | 3 | 1957 | 4 | 3 | 2 |
| 1898 | 9 | 1 | 18 | 1928 | 0 | 3 | 0 | 1958 | 6 | 5 | 4 |
| 1899 | 8 | 0 | 9 | 1929 | 1 | 1 | 0 | 1959 | 12 | 3 | 3 |
| 1900 | 16 | 1 | 51 | 1930 | 1 | 2 | 0 | 1960 | 22 | 1 | 2 |
| 1901 | 15 | 0 | 0 | 1931 | 2 | 5 | 2 | 1961 | 3 | 0 | 4 |
| 1902 | 23 | 0 | 0 | 1932 | 1 | 2 | 1 | 1962 | 3 | 0 | 4 |
| 1903 | 25 | 0 | 0 | 1933 | 0 | 1 | 0 | 1963 | 5 | 0 | 1 |
| 1904 | 17 | 0 | 0 | 1934 | 2 | 0 | 0 | 1964 | 4 | 0 | 1 |
| 1905 | 21 | 0 | 1 | 1935 | 1 | 1 | 3 | 1965 | 3 | 1 | 21 |
| 1906 | 2 | 1 | 1 | 1936 | 1 | 4 | 0 | 1966 | 8 | 0 | 2 |
| 1907 | 6 | 1 | 1 | 1937 | 1 | 4 | 1 | 1967 | 1 | 0 | 12 |
| 1908 | 1 | 0 | 1 | 1938 | 1 | 2 | 1 | 1968 | 2 | 0 | 1 |
| 1909 | 0 | 1 | 1 | 1939 | 1 | 2 | 22 | 1969 | 3 | 0 | 2 |
| 1910 | 0 | 3 | 0 | 1940 | 1 | 0 | 6 | 1970 | 1 | 2 | 5 |
| 1911 | 0 | 0 | 9 | 1941 | 1 | 0 | 18 | 1971 | 0 | 0 | 1 |
| 1912 | 0 | 0 | 0 | 1942 | 0 | 2 | 0 | 1972 | 3 | 0 | 0 |
| 1913 | 0 | 0 | 1 | 1943 | 0 | 0 | 0 | 1973 | 2 | 0 | 0 |
| 1914 | 1 | 1 | 7 | 1944 | 0 | 3 | 0 | 1974 | 3 | 0 | 0 |
| 1915 | 2 | 0 | 4 | 1945 | 0 | 0 | 0 | 1975 | 0 | 0 | 0 |
| 1916 | 1 | 0 | 4 | 1946 | 0 | 1 | 0 | 1976 | 1 | 0 | 0 |
| 1917 | 1 | 1 | 1 | 1947 | 0 | 1 | 0 | 1977 | 1 | 0 | 0 |
| 1918 | 0 | 0 | 0 | 1948 | 1 | 0 | 0 | 1978 | 0 | 1 | 0 |
| 1919 | 1 | 1 | 4 | 1949 | 0 | 0 | 0 | 1979 | 0 | 0 | 0 |

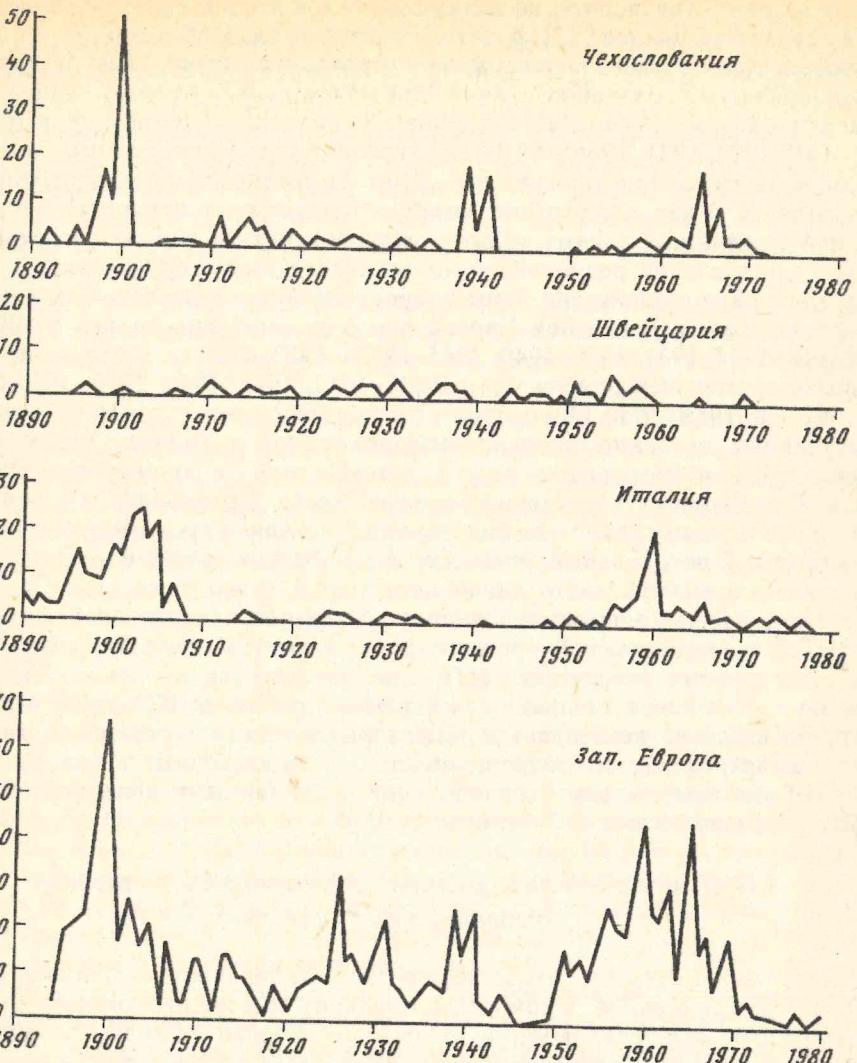


Рис. 7. Графики обвально-оползневой активности в Западной Европе по наблюдениям за 1890—1980 гг. По горизонтальной оси — годы, по вертикальной — количество событий

палеозоя. Шестилетний цикл выявлен в колебании стока рек Средней Азии и Казахстана, режиме Онежского озера, ледовых условиях в Балтийском море и т. д. Отмечен он в частоте вулканических извержений и некоторых других геологических процессов.

Особенно интересно, что тот же цикл установлен в изменении солнечной активности и лунотрясениях, 6—7-летние вариации отношений скоростей продольных и поперечных сейсмических волн отмечены А. Г. Гамбурцевым [7]. На следы 6-летней цикличности минимальной оползневой активности указывал в 1968 г. Ю. Г. Баландин. Нами также выявлялась периодичность этого порядка в ряде оползневых регионов нашей страны [11].

В настоящее время предполагается, что 6-летний цикл является ведущим в оползневом ряду циклов, где его полуцикл составляет три года, а двойной цикл — ~ 12 лет. Механизм данного цикла в настоящее время весьма гипотетичен. Более ясен механизм 60-летнего цикла, который, по мнению ряда исследователей, имеет ротационную природу [15]. Зная реперные даты (максимумы оползневой активности, связанные с этим циклом), мы по построенным временным рядам

позволяет установить, что помимо относительно крупных оползневых циклов порядка 30 и 60 лет здесь заметно проявляются внутривековые циклы средней длительностью 9, 10 и 11 лет.

Одной из главных задач было исследование еще одного внутривекового цикла средней продолжительностью около 6 лет. Этот оползневой цикл указывался в литературе [11], но обычно его объединяют с пятилетним циклом и говорят об оползневом цикле средней продолжительностью порядка 5—6 лет. В данной статье упор делается на шестилетнюю составляющую. Природные циклы такого периода отмечаются во многих природных явлениях. В. В. Шостакович [29] отмечал его в чередовании годичных слоев четвертичных отложений. В более поздних работах [10] обнаружена та же закономерность в ряде отложений мезозоя и даже

сделали попытку установить, не являются ли, как это вытекает из универсальной схемы природных циклов [12], 6-летние циклы частями 60-летнего.

Проведенный анализ подтверждает вероятность этого. Так, например, 60-летний максимум оползневых проявлений в Западной Европе отмечался в 1900 г., а следующий — в 1960 г. Менее крупные максимумы зарегистрированы в 1905, 1911, 1919, 1924, 1931, 1936, 1941, 1953 гг. Они могут быть связаны с оползневым циклом, варьирующим в диапазоне 5—7 лет и в среднем имеющим продолжительность порядка 6 лет. Отсутствие заметного максимума проявления оползней в 1948 или ближайшие к нему годы может объясняться как неточностью наших данных, так и слабой реакцией среды на исследуемой территории в указанные годы на внешние воздействия. Этот вопрос нуждается в последующем изучении.

В те же годы в Восточной Европе оползни активизировались в 1905—1906, 1912, 1918, 1924, 1931, 1936, 1940, 1945, 1952—1953, 1960 гг. В отдельных городах активизация оползней отмечалась в 1905, 1912, 1918, 1948, 1953, 1959 (Одесса), 1924 (Киев), 1955, 1959 (Волгоград) годах. Если учесть некоторую неполноту наших данных, особенно по отдельным интервалам временных рядов, то можно считать, что мы имеем здесь дело с несомненной синхронностью проявлений оползней на больших и удаленных друг от друга территориях. Отсюда следует вывод о реальности существования оползневого цикла средней продолжительностью порядка 6 лет, который, возможно, не случайно кратен 60-летнему циклу и составляет его десятую часть. Однако последний вывод нуждается в тщательной проверке и дальнейших исследованиях. Учет пространственной и времененной дискретности геологической среды позволяет ввести прогностическую направленность изучения энергетики ЭГП. Она выражается в оценке тенденции их развития, определении зон наиболее активного развития ЭГП, времени их массовых проявлений на исследуемых территориях, степени ожидаемой активности, начала катастрофических разрушений и т. д. Приведенные выше ряды служат исходным материалом для их корреляции с приливными явлениями и другими природными процессами на Земле и в космосе.

О возможном вкладе космических факторов в энергетику геологических процессов

Выше были высказаны некоторые предположения о возможной связи развития геологических процессов, в том числе имеющих важное экологическое значение, с процессами планетарными и общекосмическими. Следует, однако, констатировать, что проблема эта чрезвычайно слабо разработана, и оценка энергетического вклада этих факторов и возможных механизмов их влияния на ЭГП представляет фундаментальную проблему дальнейших научных исследований. Попытаемся ответить лишь на некоторые вопросы, которые на сегодняшний день можно считать в определенной мере решенными.

Оценивая в целом имеющиеся данные о солнечно-земных связях и воздействии на Землю более далекого космоса как энергетических источников геологических процессов, следует, очевидно, разделять две составляющие этого воздействия: 1) электромагнитное излучение и потоки космических частиц и 2) механическое (приливное) воздействие.

Вклад первой составляющей представляется весьма значительным и, вероятно, еще недооценен. Этот вклад (прямой или опосредованный) особенно очевиден для широкого круга экзогенных процессов и в общем виде, наилучшим образом оценен, по-видимому, В. И. Вернадским. Аккумуляция космической энергии «живым» и «косным» веществом верхних оболочек Земли (т. е. определенный ряд экзогенных процессов) должна, очевидно, подчиняться и отражать ритмы таких внешних воздействий. Однако возврат этой энергии (например, через преобразование вещества приповерхностных слоев земной коры в ее глубоких недрах) будет управляться уже другими процессами, со свойст-

венными им ритмами. Можно полагать, что корреляция ряда экзогенных процессов и явлений с этой составляющей космических ритмов не исключается и должна исследоваться дальше.

Что же касается механического (приливного) воздействия на Землю планет Солнечной системы и дальнего космоса вообще, то его вклад в деформации земной коры, в эндогенные и экзогенные процессы, во-первых, весьма различен по величине, продолжительности и частоте (периодичности) воздействия в зависимости от источников этого воздействия и, во-вторых, оценивается весьма трудно и неоднозначно [1].

Космическая составляющая энергетики геологических процессов может быть связана со следующими факторами, которые достаточно широко обсуждаются и используются. Это — изменения положения Солнечной системы относительно центра Галактики, колебания эксцентриситета орбиты Земли и наклона эклиптики, изменения скорости вращения Земли при ее взаимодействии с межпланетной плазмой и под влиянием других небесных тел, изменения радиуса Земли (в том числе в связи с гипотезой расширяющейся Земли), изменения гравитационной постоянной, изменения положения оси и движение полюсов вращения Земли, радиоактивный и приливный разогрев земных недр.

В 50-х годах нашего века группа видных геологов и тектонистов, в которую входили Б. Л. Личков, Г. Ф. Лунгерсгаузен, М. В. Стлас, Д. В. Наливкин и другие известные ученые, активно развивали направление, которому было предложено название «астрогеология». Были опубликованы специальные труды [3], в которых провозглашалось, что достигнутое полное физическое понимание цикличности природных процессов и что вся эмпирика, собранная геологами, находится в прекрасном соответствии с периодичностью галактического движения Солнечной системы. Но уже в 70—80-е годы обсуждение проблем астрогеологии практически сошло на нет, исчезли ссылки на работы лидеров этого направления. Конечно, к этому времени большинство из астрогеологов отошло от активной деятельности и школа, которую они сформировали, распалась, но, на наш взгляд, не это было главной причиной забвения этого направления. Причина была в отсутствии количественных энергетических оценок. Вся схема оказалась чисто умозрительной и в итоге нежизнеспособной. Остановимся коротко на разборе логики рассуждений сторонников «галактической цикличности».

Историческая геология располагает достаточно подробным описанием смены режимов развития регионов, изменений в характере накопления осадков, скоростей эрозии, чередования периодов потепления и похолодания климата. Вся эта эмпирика указывает на наличие квазицикличности природных процессов с продолжительностью периода 200—250 млн. лет. Это фактический материал. Естественно желание дать этой цикличности физически обоснованное объяснение. Астрогеологи поступили довольно просто. Они поставили вопрос: где еще имеются цикличности с близкой к 200 млн. лет продолжительностью? Понятно, что в пределах Солнечной системы такой цикличности нет. Максимальная продолжительность обращения Нептуна и Плутона не превышает 200 лет. Следовательно, такой продолжительности периодичность должна иметь место вне Солнечной системы, т. е. в пределах Галактики.

Заметим, что логика рассуждений была очень однобокой — искали просто длительную цикличность, забывая, что для таких масштабов времени возрастают размеры орбит, а, следовательно, модули ускорений по таким пологим траекториям с большим радиусом орбиты должны быть ничтожно малыми. Действительно, центр масс Солнечной системы движется вокруг галактического центра по орбите с радиусом $1,6 \cdot 10^8$ а. е. (т. е. в 100 млн. раз большим, чем расстояние Земля — Солнце, равное 1 а. е.). Центробежные эффекты, соответствующие этому движению на Земле, могут достигать значений 10^{-15} см/с. Заметим, что самая высокоточная современная аппаратура регистрирует величины порядка 10^{-6} см/с. Следовательно, никаких механических эффектов ни на одном из тел Солнечной системы это движение не может обусловливать. И хотя по исследо-

ванию пространственных скоростей звезд П. П. Паренаго оценивает периодичность движения вокруг галактического центра в 150—250 млн. лет, она не имеет никакого отношения к геодинамике, к геотектонике.

В рассуждения астрогеологов были введены некоторые детали, которые должны были якобы объяснить периодические изменения климата. Было предположено, что Солнечная система проходит то пылевые рукава Галактики, то участки, свободные от пыли, но это опять же просто повествование, без каких-либо оценок следствий. Действительно, при прохождении пылевых участков должны были бы возникнуть не только изменения в поступлении солнечного тепла, но также эффекты торможения орбитального движения планет, и это главным образом отразилось бы не на Земле, а на планетах, имеющих большие значения линейных скоростей. Известный закон планетных расстояний Тициуса — Боде не подтверждает такие нарушения в Солнечной системе.

В общем отметим, что такой прямолинейный подход к поиску цикличности был неудачным. Цикличность, обнаруженная геологами, это цикличность медленной перестройки системы. Такая цикличность является внутренним свойством медленного изменения динамических параметров системы Земля — Луна, отражающегося в глубинных и поверхностных процессах. Развитие галактик и их составных частей имеет свои характерные масштабы, к которым нет необходимости относить эндогенные процессы, происходящие на Земле.

Оценим теперь вариации скорости вращения Земли при ее взаимодействии с межпланетной плазмой. Проводящая межпланетная среда оказывает сопротивление силовым линиям вращающегося внутреннего диполя. Убыль энергии вращения Земли из-за излучения альфеновских волн (плазма вращается с Землей на расстоянии $\sim 10R$, где R — радиус Земли) оценена как $2 \cdot 10^{-16}$ эрг/с [23]. Имеется систематическое различие между альбедо утренним и вечерним. Полагают его равным нулю для интервала местного времени 6—12 час. и единице для интервала 12—18 час. Отталкивающая сила светового давления Солнца, действующая на Земле, равна $P = 4,5 \cdot 10^{-5}$ дин/см² на поглощающей стороне, на отражающей стороне она равна $2P$. Полный момент $L = 1/3 \text{ па} = 4 \cdot 10^{21}$ дин/см (для сопоставления: приливный момент Луны, действующий на Земле, составляет $4 \cdot 10^{23}$ дин · см).

Рассмотрим также соответствие астрометрических данных гипотезе расширяющейся Земли. Согласно этой гипотезе, из-за некоторых процессов изменяются размеры Земли, а следовательно, должна меняться и величина главных моментов ее инерции. Систематическое возрастание момента инерции может быть обнаружено по астрометрическим материалам. Однако до настоящего времени не выявлено каких-либо количественных характеристик, которые подтверждали бы расширение Земли [33, 34].

Из данных современных астрономических и спутниковых наблюдений и лазерной локации Луны следует также, что вариации гравитационной постоянной, если они вообще имеются, не превосходят $\sim 5 \cdot 10^{-15}$ относительного значения в столетие [33, 34].

Из приведенных выше сведений и ряда других известных данных следует, что среди космических процессов и факторов, которые могут предполагаться в качестве энергетических источников геологических процессов, в том числе периодического характера, и которые следовало бы учитывать в прогностических построениях, наибольший интерес представляют процессы, изменяющие положение оси вращения Земли и скорость ее вращения, а также приливные силы в системе Солнце — Земля — Луна. Их геодинамическое значение представляется значительным, хотя еще явно недостаточно изученным (особенно в части приложения к экзогенным процессам).

Весьма существенным может быть энергетический вклад инерционных сил, вызванных изменением параметров вращения Земли и мощными и быстрыми

тектоническими движениями (особенно по радиальной составляющей) крупных блоков литосферы.

Заключение

Приведенные выше данные, выводы и предположения, очевидно, не охватывают всех сторон энергетики экзогенных геологических процессов. Но нам представляется, что они достаточно хорошо показывают широчайший спектр факторов, которые определяют эту энергетику и в той или иной мере могут и должны учитываться при построении геодинамических моделей и мониторинговых систем. Ясно, что проблема энергетики геологических процессов при кажущейся ясности вопроса очень сложна и весьма слабо изучена. Вместе с тем очевидна насущная необходимость ее глубокого исследования и практического использования. Необходимость эффективного прогноза негативных явлений, связанных с использованием геологической среды, выдвигает на первый план всесторонний анализ совокупного воздействия на эту среду самых разнообразных факторов, которые реализуются в некотором едином проявлении (процессе). Энергетика этого процесса или некоторой совокупности процессов является в этом анализе ключевым звеном.

Развитие рассматриваемого направления исследований имеет большое значение для целей охраны окружающей среды и ее рационального использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсяюк Ю. Н. Сопоставление эндогенных режимов материков в устойчивую геосинклинально-платформенную стадию со схемой приливной эволюции системы Земля—Луна//Строение и эволюция тектоносферы. М.: ВИНТИ, 1987. С. 193—215.
2. Алешин А. С., Бархатов И. И., Несмеянов С. А. и др. Тектонические разрывы на участках сейсмического микрорайонирования. М.: Наука, 1982. 135 с.
3. Астрогеология/Под ред. Б. Л. Личкова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 230 с.
4. Артемьев М. Е. Современное состояние проблемы изостазии//Строение и эволюция тектоносферы. М.: ВИНТИ, 1987. С. 216—252.
5. Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука, 1988. 133 с.
6. Величко А. А., Климанов В. А., Беляев А. В. Каспий и Волга 5,5 и 125 тыс. лет назад//Природа. 1987. № 3. С. 60—66.
7. Гамбуриев А. Г. Ритмы в природе и некоторые вопросы стратегии природопользования//Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. Вып. 1. М.: РАЕН, Ассоциация «Прогнозы и циклы», 1991. С. 138—143.
8. Голицын Г. С. Нужна ли переброска воды в Каспий?//Природа. 1987. № 3. С. 66—72.
9. Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. 172 с.
10. Кукал З. Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.
11. Кюнцель В. В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР и их региональный прогноз. М.: Недра, 1980. 210 с.
12. Кюнцель В. В. Универсальная система природных циклов//Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. Вып. 2. М.: РАЕН, Ассоциация «Прогнозы и циклы». 1992. С. 92—97.
13. Кюнцель В. В., Матвеев В. С., Селюков Е. И. Динамическая структура земной коры и ее влияние на оползневой процесс//Инж. геология. 1989. № 1. С. 3—8.
14. Кюнцель В. В., Матвеев В. С., Селюков Е. И. Эндогеодинамические факторы карстовых процессов//Противокарстовая защита объектов строительства. Куйбышев: Куйб. Арх.-строит. ин-т. 1990. Т. 1. С. 36—40.
15. Кюнцель В. В., Селюков Е. И. Георитмы природных процессов и механизм их проявления//Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. Вып. 1. М.: РАЕН, Ассоциация «Прогнозы и циклы», 1991. С. 98—106.
16. Левинтанус А. Ю. Уроки озера Чад//Природа. 1991. № 10. С. 23—28.

17. Лукъянов А. В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М.: Наука, 1991. 141 с.
18. Макаров В. И. Новейшие орогены, их структура и геодинамика: Докл. на соис. уч. ст. д-ра геол.-мин. наук. М.: ГИН АН СССР, 1990. 57 с.
19. Макаров В. И., Лукина Н. В., Щукин Ю. К. Газлийские землетрясения 1976 г. Гл. III § 6 и гл. IV § 1. М.: Наука, 1984. 200 с.
20. Макаров В. И., Сенин Б. В. Основные принципы, аспекты и проблемы дешифрирования и интерпретация линеаментов и кольцевых образований//Космическая информация в геологии. М.: Наука, 1983. С. 305—321.
21. Макаров В. И., Соловьева Л. И. Перекрестный структурный план земной коры и проблема проявления ее глубинных элементов на поверхности//Исслед. природной среды космическими средствами. Т. 5. Геология и геоморфология. М.: ВИНТИ, 1976. С. 18—42.
22. Макаров В. И., Трифонов В. Г. Монголия — внутриконтинентальная область преобладания новейших сдвиговых перемещений//Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1983. С. 235—275.
23. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир, 1964. 384 с.
24. Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 491 с.
25. Оползни и сели. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1984. Т. 1. 351 с. Т. 2. 249 с.
26. Немец В., Квет Р. Проблемы применения математических методов для геологических исследований с учетом иерархий в планетарных равноудаленных разрывных системах//Методология геологических исследований. Владивосток, 1976. С. 49—56.
27. Селюков Е. И. Влияние эндогеодинамических факторов на развитие оползней Южного берега Крыма: Автограф. дис ... канд. геол.-мин. наук. М.: ВСЕГИНГЕО, 1989. 21 с.
28. Трифонов В. Г., Макаров В. И., Скобелев С. Ф. Таласо-Ферганский активный правый сдвиг//Геотектоника. 1990. № 5. С. 81—92.
29. Шостакович В. В. Иловые отложения озер и периодические колебания в явлениях природы//Зап. ГГИ. 1984. Т. 13. С. 62—66.
30. Шульц С. С. Планетарная трещиноватость (основные положения)//Планетарная трещиноватость. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. С. 5—37.
31. Шульц С. С. Геотектоника. Л.: Недра, 1979. 272 с.
32. Arrow T., Stephens D. Hydrologic Characteristics of the Great Salt Lake, Utah: 1847—1986//U. S. Geol. Surv. 1990. Water-Supply Paper 2332. 32 p.
33. Burša M. On the expending Earth hypothesis//Stud. geophys. geod. 1984. Т. 28. V. 3.
34. Burša M. A note on upper limmts for hypothetic variation in Newtonian constant of gravitation//Stud. geophys. geod. 1984. Т. 28. V. 3.
35. Gilbert G. K. Lake Bonneville//U. S. Geol. Surv. Monograph. 1890. V. 1. 438 p.
36. Hobbs W. H. Repeating patterns in the relief and in the structure of the Land//Bull. Geol. Soc. Amer. 1911. V. 22. P. 123—176.
37. INQUA, XIII Intern. Congress, Abstracts. Beijing, 1991. 462 p.
38. Špurec M. Historical catalogue of slide phenomena//Stud. geographica. Brno: ČS Acad. ved, 1972. 178 p.
39. Wertz J. B. Detection and significance of lineaments and lineament intersections in parts of the Northern Cordillera//Proc. 1st Intern. Conf. on the New Basement Tectonics. Ital Geol. Assoc. Publ. N 5. Salt Lake City. Utah, 1976. P. 42—53.

Инженерно-геологический
и геоэкологический научный центр РАН
ВСЕГИНГЕО
Институт физики Земли РАН

Поступила в редакцию
11.V.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогоеология. Геокриология

2 · 1995

УДК 624.131

© 1995 г. А. А. ВАРГА

ЭМПИРИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ СКАЛЬНЫХ МАССИВОВ

В статье рассматривается одно из наиболее примечательных событий в современной инженерной геологии скальных пород — быстрое развитие и внедрение в практику изысканий методов эмпирических классификаций, предназначенных для оценки геомеханических свойств массивов и ускорения проектных решений. Излагаются основы и принципы построения, основные особенности и возможности этих методов, а также их ограничения. Приводятся многочисленные примеры их успешного применения в проектно-изыскательских работах по строительству туннелей, крупных подземных камер, плотин, откосов и т. д., подтверждающие бесспорную эффективность и большую перспективность эмпирических классификаций.

Введение

В последние 20 лет отмечается ускоренное развитие и внедрение в практику проектно-изыскательских работ методов инженерно-геологической оценки скальных массивов с помощью эмпирических классификаций. Первые эмпирические классификации, составленные на основе опыта строительства инженерных сооружений, появились в 50—60-х годах. Массивы в них были сгруппированы по определенным геологическим факторам в несколько классов, характеризующихся сходными инженерно-геологическими свойствами и состоянием. Например, в классификации Дира [2] выделялось 5 классов массивов начиная от «очень слабых» до «прочных» в зависимости от *RQD*. В 70-х годах были разработаны более совершенные классификации с увеличением количества учитываемых параметров и с балльной оценкой их значимости («взвешенности»). Наиболее известными и распространенными из них являются классификации Биенявского [9] и Бартона [1, 8] для применения в подземном строительстве.

В 80—90-х годах были разработаны новые эмпирические классификации, предназначенные для решения специфических проблем: оценки устойчивости откосов, эрозионной прочности скальных пород в нижнем бьефе плотин и т. п. К настоящему времени известно более 30 различных классификаций, более или менее широко используемых во многих странах, за исключением только России с ее несколько консервативной нормативно-методической системой. Такое быстрое развитие и внедрение в проектирование многочисленных эмпирических классификаций настоятельно требует проведения их сравнительного анализа, уточнения потенциальных возможностей и ограничений по сравнению с традиционными методами, а также оценки надежности путем изучения опыта их применения.

Общие сведения об эмпирических классификациях

Среди причин быстрого развития эмпирических методов важное место занимают общизвестные трудности точной и надежной инженерно-геологической оценки конкретных скальных массивов, связанные прежде всего с многофакторностью, иерархической неоднородностью, анизотропией и пространственно-временной изменчивостью их свойств, неудовлетворительным знанием естественно-напряженного состояния и масштабного эффекта, а также сложностью процессов их взаимодействия с инженерным сооружением. Лабораторные исследования образцов характеризуют лишь материал породы и мало что дают для оценки массива, в то время как дорогостоящие и трудоемкие полевые опыты проводятся обычно в недостаточном количестве, представляя лишь редкие «точечные» результаты, зависящие к тому же от метода исследования. Например, измерения деформационных свойств массива с использованием штампов, щелевых домкратов, прессиометров и геофизических данных дают существенно различные результаты. Все это затрудняет перенос результатов геомеханического опробования на массив и обуславливает приближенный характер исходных данных для проектных расчетов как традиционными аналитическими методами, так и занявшим к настоящему времени прочное место численным моделированием.

В общей последовательности проектно-изыскательских работ для крупных инженерных сооружений важным критическим этапом представляется переход от сложной геологии реального массива к его идеализированной геомеханической модели, необходимой для расчетов методами классической механики. Такая схематизация массива и многочисленные допущения в отношении его сплошности или блочного строения, однородности, изотропности, напряженного состояния, масштабного фактора и т. п. являются одним из наиболее уязвимых мест в обеспечении точности и надежности проектирования. Собственно геомеханические расчеты тоже вносят в проектирование некоторый элемент неопределенности, что особенно заметно в связи с трудностями учета сложных пространственно-временных изменений гидро-напряженно-деформированного состояния оснований высоких плотин, отсутствием надежных критериев для принятия трудоемких трехмерных решений, отсутствием хороших методов прогноза размыва пород на выходных участках водо-сбросных сооружений и т. д. Однако эмпирические методы позволяют избежать все эти недостаточно разработанные методические проблемы.

Успешному развитию эмпирических классификаций содействовало также всеобщее осознание необходимости использования огромного опыта, накопленного во всех странах при строительстве разнотипных сооружений в различных геологических условиях. Один из примитивных способов использования такого опыта состоит в определении геомеханических характеристик оцениваемого массива и принятии проектных решений путем сравнения с хорошо изученным основанием без проведения специального полевого опробования и проектных расчетов. Этот метод поиска инженерно-геологических аналогов представляется малоперспективным, несмотря на привлечение «теории» подобия, поскольку в природе не существует двух совершенно одинаковых массивов, что обусловлено индивидуальными особенностями их строения и формирования. Причем, принимая во внимание только девять из большого числа параметров, существенно влияющих на свойства массива, и расчленив каждый из них на 5 градаций, можно получить до 2 млн. возможных сочетаний этих параметров. Практическая невыполнимость анализа такого большого набора аналогов вынуждает сравнивать изучаемый массив лишь с ограниченным количеством классов массивов, увязанных с осредненными для каждого класса свойствами и проектными решениями.

Метод эмпирических классификаций сводится, таким образом, к решению двух основных проблем: классификации скальных массивов путем быстрой, но приближенной оценки геологических факторов, существенно влияющих на свойства массива, и корреляции выделенных категорий массивов с геомеханическими свойствами и оптимальными проектными решениями. Соответственно все разно-

Таблица 1

Эмпирические классификации, используемые при инженерно-геологическом изучении скальных массивов

| Автор | Год опубликования | Принцип классификации | Назначение классификации | Литература |
|-------------------------|-------------------|---|---|------------|
| Терцаги | 1946 | Разделение на 5 классов по структуре массива | Выбор типа крепления для туннелей | [2] |
| Мюллер | 1963 | Разделение на 4 класса по прочности на сжатие и расстоянию между трещинами | Определение сопротивления массива сдвигу | [2] |
| Дир | 1964 | Разделение на 5 классов по <i>RQD</i> | Определение общей прочности массива | [2] |
| Дир и Миллер | 1966 | Разделение на 3 класса по отношению модуля упругости к прочности на сжатие | Определение «качества» массива | [2] |
| Франклин | 1971 | Разделение на 6 классов по прочности на сжатие и расстоянию между трещинами | Определение «качества» массива | [2] |
| Биенявский | 1973 | Разделение на 5 классов по рейтингу (RMR) | Определение свойств массива, выбор типа крепления подземной выработки и др. | [9] |
| Бартон | 1974 | Разделение на 9 классов по рейтингу (<i>Q</i>) | Определение свойств массива, выбор ширины свода и типа крепления подземной выработки | [1, 8] |
| Лаубшер | 1977 | Разделение на классы по рейтингу (MRMR) | Определение устойчивости откоса | [21] |
| Хонг | 1978 | Разделение на 5 классов по рейтингу (<i>Z</i>) | Определение «качества» массива | [18] |
| Булычев | 1982 | Разделение на 5 категорий по рейтингу (<i>S</i>) | Определение устойчивости массива для подземных выработок | [3] |
| Кикучи, Сайто, Кусуноки | 1982 | Разделение на 6 классов по геологическим параметрам | Определение свойств массива, несущей способности и глубины съема выветрелых пород в основании плотины | [20] |
| Кендорский | 1983 | Разделение на классы по рейтингу (MBR) | Определение прочности массива и выбор крепления подземных выработок | [19] |
| Романа | 1985 | Разделение на 5 классов по рейтингу (SMR) | Определение устойчивости откоса | [29] |
| Спурр | 1985 | Разделение на классы по рейтингу (RMR с дополнительными параметрами) | Определение эрозионной прочности массива | [30] |

Таблица 1 (окончание)

| Автор | Год опубликования | Принцип классификации | Назначение классификации | Литература |
|--|-------------------|--|--|------------|
| Ванхе и Нианксин | 1986 | Разделение на 5 классов по рейтингу (W) | Прогноз обрушений в подземных выработках | [34] |
| Хомма и Камемура | 1986 | Рейтинг (e_n) | Прогноз конвергенции и выбор крепления подземных выработок | [17] |
| Антьюнес и Инфантини | 1986 | Разделение на классы по восьми параметрам | Определение эрозионной прочности массива | [7] |
| СНиП 2.02.02-85 | 1988 | Разделение на категории по шести факторам | Определение прочности на сдвиг по трещине, массиву и контакту бетон — скала | [4] |
| Хайнес и Тербрюгге | 1991 | Разделение на 10 классов по рейтингу ($MRRM$) | Определение устойчивости откоса | [15] |
| Брито | 1991 | Разделение на 5 классов по трем трещинным параметрам | Определение эрозионной прочности массива | [10] |
| Аль-Хартхи и Хенчер | 1993 | Двуступенный рейтинг (Rc) | Определение прочности массива на сдвиг, прогноз ослабленных зон, выбор крепления подземных выработок | [5] |
| Ангелидис, Коннантакис, Закас | 1993 | Разделение на 3 класса по четырем факторам | Планирование землеустройства и прогноз условий для местного строительства | [6] |
| Хэк и Прайс | 1993 | Двуступенный рейтинг (SSR) | Оценка устойчивости откоса | [14] |
| Tg. CWRC | | Разделение на 5 классов по рейтингу (M) | Определение «качества» и районирование основания плотины «Три ущелья» | [35] |
| Проект национального стандарта (Китай) | 1994 | Двуступенная классификация по рейтингу (BQ) | Определение свойств и районирование массива для оценки устойчивости сооружений | [35] |

образие эмпирических классификаций (табл. 1) связано с различным подходом отдельных авторов к решению этих двух методических вопросов. Поскольку эмпирический подход может не только обеспечить исходными данными обычное проектирование, но также и заменить в некоторых случаях аналитические расчеты и численное моделирование на принципиально другой основе, то этот метод можно рассматривать как самостоятельное направление в проектировании, несмотря на его пока еще не вполне удовлетворительную точность. Иногда этот метод называют не совсем точно «геомеханическими» классификациями, хотя фактически он выходит за рамки истинной геомеханики, объединяя полевые измерения геологических факторов с конкретными проектными решениями. По существу он является инженерно-геологическим экспресс-методом, позволяющим путем интерпретации результатов обычных геологических наблюдений и описаний разведочных выработок оценить свойства скальных массивов с учетом их неоднородности и рекомендовать оптимальные проектные решения.

Если при обычных изысканиях получают достаточно точные характеристики

свойств, измеренные в отдельных точках опробования и которые необходимо распространить на весь неоднородный массив с учетом масштабного фактора, то с помощью эмпирической классификации можно получить приближенную оценку свойств в виде микрорайонирования в пределах всех разведочных выработок и описанных обнажений на поверхности участка. Таким образом, применение эмпирического подхода, как бы увеличивая исследуемый объем массива, способствует решению проблемы переноса результатов опробования на массив при снижении точности самого определения этих свойств. Пересчет геологических параметров в геомеханические проводится очень быстро и дешево при камеральной обработке геологической документации без какого-либо значительного повышения точности полевых замеров. Эмпирический метод можно применять и при наличии результатов одного только разведочного бурения, что имеет существенное значение при проектировании подземных сооружений, особенно глубинных.

Недостатком этих эмпирических методов является часто очень упрощенная классификация массивов. Трудно ожидать высокой точности от метода, в котором все многообразие скальных массивов и их свойств сводится к трем — десяти классам с осредненными характеристиками (или обширными диапазонами). Несколько упрощена и общая картина геологических факторов. Так, из всех структурных факторов учитываются только трещины и не принимаются во внимание такие структурные элементы, как разрывные нарушения, складки, дайки и др. Обычно недооцениваются анизотропия свойств, напряженное состояние массива и сейсмический фактор. Недостаточное внимание уделяется, как правило, техногенным факторам по сравнению с естественными. При выборе проектных решений также может быть завышен коэффициент запаса, поскольку при создании классификации положительный опыт принимается с коэффициентом устойчивости большим единицы, но насколько больше — остается неясным.

Построение классификаций скальных массивов

Для разделения массива на классы большое значение имеет выбор необходимых для этого параметров, которые должны легко определяться при геологических наблюдениях и в то же время существенно влиять на их свойства. Рассмотрение существующих классификаций выявляет значительные различия в составе и количестве учитываемых геологических факторов (табл. 2), что отражает некоторую субъективность авторов, обусловленную отсутствием надежного научного обоснования выбора исходных параметров и количественной оценки влияния каждого из них на то или иное свойство. Всего в эмпирических классификациях используется до 20 геологических параметров (*in situ*), включая характеристики трещиноватости, свойства материала пород и массива. При этом наиболее часто применяют такие показатели, как интенсивность трещиноватости, раскрытие, морфологические особенности и заполнитель трещин, а также прочность породы на одноосное сжатие. Реже встречаются *RQD*, длина трещин, форма блоков и обводненность.

В отдельных классификациях учитывается от 1 (классификация Терцаги) до 11 (классификация Хайнеса и Тербрюгге), но чаще от 6 до 10 исходных геологических параметров. Следует отметить, что многофакторность геомеханических свойств массива делает классификации с малым количеством параметров бесперспективными, а большое число учитываемых факторов не гарантирует высокую точность оценки свойств массива. Последнее связано с тем, что из трещинных параметров обычно не учитывают порядки трещин, степень прерывистости трещинной решетки. Не принимается в расчет, что многие характеристики в той или иной степени взаимосвязаны (*RQD* и интенсивность трещиноватости, степень выветривания и прочность на сжатие и др.) или не поддаются точному измерению, например ширина трещин и параметр *RQD*, значение которого зависит от опыта и квалификации бурового мастера, от наклона скважины, и его нельзя измерить непосредственно при геологической документации стен горной выработки. Однако

Таблица 2

Геологические факторы, учитываемые

| Авторы классификации | Геологические факторы | | | | | | | | |
|----------------------|------------------------------|---------------|------------------------|-----------------------------------|-----|--------------------|---------------------|--------------|----------------------|
| | интенсивность трещиноватости | ширина трещин | морфология трещин, JRC | прочность на одностороннее сжатие | RQD | заполнитель трещин | ориентировка трещин | длина трещин | степень выветривания |
| Биеняевский | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| Бартон | | | + | + | + | | | | |
| Лаубшер | + | + | + | | + | + | + | + | |
| Хвонг | + | | | | | | | | |
| Булычев | + | + | + | | | + | + | | |
| Кикучи и др. | + | + | | | | | | | + |
| Кендорский | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| Романа | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| Спурр | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| Ванхе и Нианксин | | + | | + | | + | + | | |
| Хомма и Камемура | | | | | | | | | + |
| Антьюнес и Инфантини | + | + | + | + | | + | | | |
| СНиП 2.02.02-85 | + | + | | + | | | | | + |
| Хайнес и Тербрюгге | + | + | + | | + | + | + | + | |
| Брито | + | + | | | | | | | |
| Аль-Хартхи и Хенчпер | + | + | + | + | + | | | + | |
| Ангелидис и др. | + | | | + | + | | | | |
| Хэк и Прайс | + | + | + | | + | + | + | + | |

наибольшие сложности связаны с определением «взвешенности», которую иногда не учитывают вообще или принимают постоянной для всех свойств и типов массивов.

Для оценок эрозионной прочности массива в нижнем бьефе гидроузла, а также устойчивости подземных выработок и откосов котлованов очень важно включить в число исходных характеристик техногенные факторы, которые можно учитывать двояко: вместе с геологическими показателями непосредственно при разделении массивов на классы или при корреляции выделенных классов массивов с проектными решениями. Из техногенных факторов в эмпирических классификациях используются: ориентировка сооружения относительно трещин, влияние строительных и взрывных работ, влияние техногенного выветривания и разгрузки пород. Наибольшее количество техногенных факторов используется в классификациях Лаубшера и Хайнеса (по 4 фактора), а также в классификациях Романа и Ванхе (по 3 фактора).

В целях снижения субъективности оценок исходных параметров иногда предлагаются использовать результаты геомеханических и геофизических исследований и, в частности, показатели сопротивления массива сдвигу (классификация Хонгга). Однако проведение названных выше исследований лишает

в эмпирических классификациях

емпирические классификации таких важных преимуществ, как быстрота и дешевизна оценки массива. Более уместны в этих условиях экспресс-методы, как, например, определение прочностных параметров трещин по способу Бартона-Бандиса, измерение твердости пород с помощью молотка Шмидта (классификация Кикучи) [20], определение скорости ультразвуковых волн в образце (классификация Хонга) [18] и др. При этом некоторая приближенность ускоренных методов сравнима с обычной неточностью оценок трещинных параметров при геологических наблюдениях.

Разделение массивов на классы производится, как правило, на основе рейтинга, т. е. по специфическому для каждой классификации количественному интегральному показателю. Обобщение параметров в такой интегральный индекс массива проводится обычно с учетом «взвешенности» каждого отдельного исходного параметра при помощи баллов. При этом интегральный индекс массива получают за счет сложения баллов, характеризующих каждый параметр, или их умножения и деления.

Рейтинг путем суммирования баллов ведет начало с классификации Биенявского, основанной на индексе *RMR*, равном сумме баллов, характеризующих

Прочностные характеристики скальных массивов по классификации Биенявского

| Класс массива | I | II | III | IV | V |
|------------------------|---------------|---------|--------------------|---------|--------------|
| «Качество» массива | Очень хороший | Хороший | Удовлетворительный | Плохой | Очень плохой |
| Рейтинг (<i>RMR</i>) | 100—90 | 90—70 | 70—50 | 50—25 | <25 |
| Сцепление (Па) | >300 | 200—300 | 150—200 | 100—150 | <100 |
| Угол трения, град | 45 | 40—45 | 35—40 | 30—35 | <30 |

RQD, интенсивность трещиноватости, раскрытие, длину, морфологию и заполнитель трещин, прочность породы и ориентировку трещин относительно сооружения [9]. Классификация Лаубшера основана на индексе *MRMR*, в котором к сумме *RMR* добавлены баллы, учитывающие влияние напряжений и выветрелости массива, а также воздействие взрывных работ [21]. Сходным образом проводится рейтинг в классификации Кендорского (по индексу *MVR*) [19], в классификации Романа (по индексу *SMR*) [29] и т. д.

Основоположником рейтинга путем умножения или деления баллов является Бартон, его классификация базируется на индексе *Q*,

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF},$$

где J_n — количество систем трещин, J_r — характеристика неровностей стенок трещин, J_a — характеристика заполнителя и прочности стенок трещин, J_w — степень обводнения и *SRF* — отношение прочности породы на сжатие к максимальному естественному напряжению [1, 8]. Сходным образом определяется индекс *S* в классификации Булычева [3] и два индекса W_1 и W_2 в классификации Ванхе (в отношении вывалов по трещинам и обрушений брекчированных пород) [34].

Реже встречаются более упрощенные классификации с «невзвешенными» параметрами. К ним относятся классификации Дири, построенная на одномерной корреляции индекса массива с *RQD* [2]; классификация Дири и Миллера, в которой рейтинг определяется по отношению модуля упругости к прочности породы на одноосное сжатие [2]; классификация Хвонга с рейтингом по индексу *Z*, равному произведению сохранности массива V_m^2/V^2 (где V_m — скорость продольных волн в массиве и V — в образце), сопротивления сдвигу $\tan \phi$ и сопротивления породы сжатию (в процентах) [18]. «Невзвешенные» параметры используются и в классификации Хомма, где индекс l_n массива определяется путем осреднения процентов от наихудших значений для каждого исходного параметра [17].

В 1993 г. появились классификации с двуступенным рейтингом [5, 14, 35], в них сначала определяется основной индекс, общий для всех типов сооружений, а затем этот рейтинг корректируется с учетом проектируемого сооружения. В классификации Хэка и Прайса, например, корректированный индекс *SSR* применяется для оценки устойчивости откосов, а в классификации Аль-Хартхи и Хенчера корректированный индекс *R_c* используется при проектировании подземных сооружений.

Известно также несколько упрощенных классификаций, где разделение массивов на классы производится без рейтинга: классификация Терцаги с неколичественными критериями; классификации Мюллера и Франклина [2], в которых категории массивов определяются по двум параметрам (расстоянию между трещинами и прочностью материала породы на одноосное сжатие); классификация Брито, в ней классы выделяются с учетом типа трещинной решетки, размера элементарного блока, раскрытия трещин и изменений породы в их стенах [10], а также классификация, приведенная в СНиП 2.02.02-85 [4]. Таким образом, среди эмпирических классификаций можно выделить 3 основных морфологических типа: 1) разделение массива на классы по их рейтингу; 2) разделение на классы без рейтинга и 3) определение рейтинга без выделения классов, при этом рейтинг может быть одно- или двухступенным.

Сопоставление классификаций со свойствами массивов и проектными решениями

Соотношение отдельных классов (или индексов) массивов с их свойствами и типовыми проектными решениями, представляющее собой важное, непосредственно эмпирическое звено рассматриваемого метода прогнозной оценки скальных

пород, существенно зависит от типа проектируемого сооружения. Так, для устойчивости подземных сооружений особое значение имеет напряженное состояние массива, контролирующее конвергенцию стен выработок, для арочных плотин — прочность и деформируемость примыканий, для гравитационных бетонных плотин — прочность оснований на сдвиг, для склонов — ориентировка трещин относительно рельефа и т. д. Определенное влияние оказывают и размеры сооружений. Так нельзя, например, прогнозировать устойчивость туннеля без учета ширины его свода и крепления, устойчивость откоса без знания его высоты и т. д. Отсюда следует неизбежность различий в методах классификаций для подземных сооружений, оснований плотин, откосов и др.

При сопоставлении с классами скальных массивов используют средние значения или диапазоны изменений свойств для каждого класса, а также рейтинг, более точно характеризующий каждый массив в отдельности. Эмпирические классификации обычно применяют как для определения прочностных и деформационных свойств, так и с целью установления общего интегрального показателя «качества» того или иного массива. С помощью последнего можно оценить свойства конкретного массива качественно (классификация Терцаги и др.) или количественно (классификации Хвонга и др.). Определение «качества» массива имеет значение для начальных стадий проектирования и для общей характеристики степени его неоднородности.

Приближенный модуль деформации массива можно определить с помощью индекса *RMR* (классификация Биенявского) по формуле $E_m = 2RMR - 100$ или $E_m = 10 \frac{RMR - 10}{40}$, а также на основе индекса *Q* (классификация Бартона) по

формуле $E_m = 25 \lg Q$. По данным Нibble, зависимость $E_m = K \sigma_c [(RMR - 8)10^{-2}]^{-2}$, где σ_c — прочность на одноосное сжатие, является иногда более точной [27].

Зависимость приближенных прочностных характеристик скального массива от его рейтинга по классификации Биенявского (*RMR*) приведена в табл. 3 [2]. В классификации Аль-Хартхи и Хенчера прочность массива определяют на основе индекса *R_c* по следующим зависимостям: $\phi = 5,0 + 0,5R_c$ и $C = 5,0R_c$ [5]. В таблице СНиП 2.02.02-85 указаны ориентировочные значения $\tan \phi$ и *C* для различных предельных состояний и разных условий сдвига (по трещине, по массиву и по контакту бетон — скала) [4]. В классификации Мюллера выделены 4 категории массивов по сопротивлению сдвигу и одноосному сжатию [2]. Зависимость прочности массива на растяжение от его рейтинга (*RMR*) получена Хоеком и Брауном [27].

Следует отметить быстроту и дешевизну подобных оценок геомеханических свойств массива, что особенно важно на ранних стадиях изысканий и для небольших сооружений, а также при оперативном рабочем проектировании в процессе строительства. Большое практическое значение этого метода проявляется и при изучении неоднородного строения массива с помощью инженерно-геологического крупномасштабного районирования, т. е. путем его расчленения на

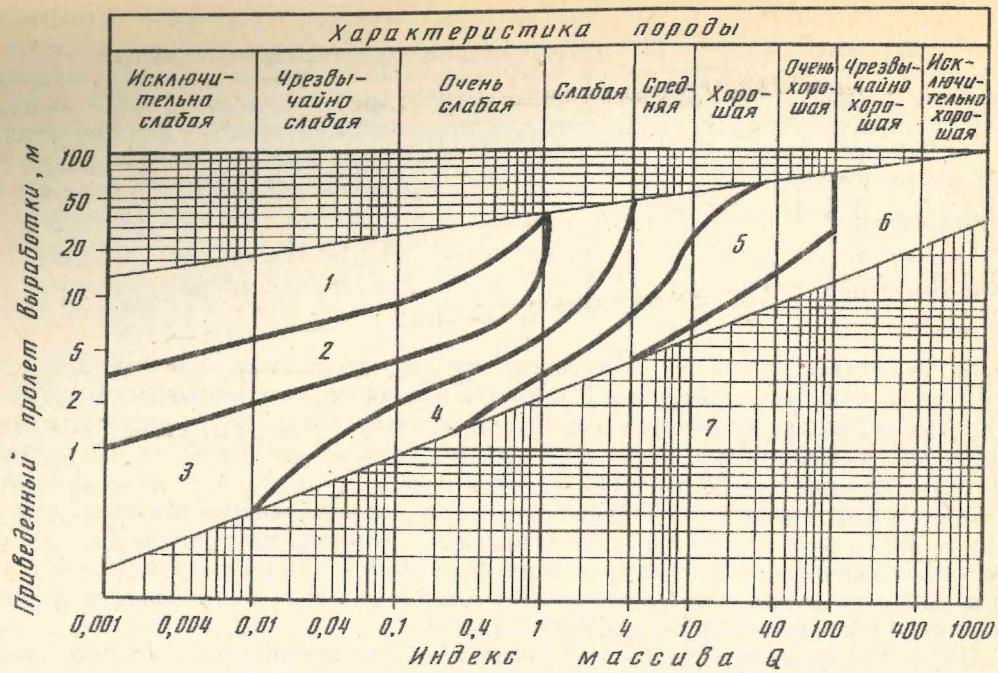


Рис. 1

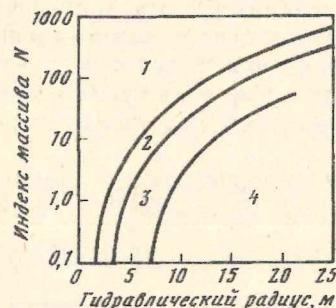


Рис. 2

объемные квазиоднородные в определенном масштабе участки. Значения такого районирования для оптимизации дальнейшего геомеханического опробования и переноса «точечных» результатов испытаний на массив трудно переоценить.

Эмпирические классификации для предварительного выбора проектных решений особенно часто применяются при подземном строительстве ввиду общеизвестных трудностей разведки глубинных частей скальных массивов, при этом наиболее распространены классификации Биенявского и Бартона, часто используемые в качестве основы для других классификаций. С помощью этих классификаций не только прогнозируют условия проходки и устойчивости горных выработок, дробимость пород, обрушения и конвергенцию стен и кровли выработок, но и выбирают оптимальные для данного класса массивов проектные решения в отношении способа проходки, а также величины временной и постоянной крепи (рис. 1). При оценке устойчивости и выборе способа крепления необходимо принимать во внимание ширину выработки, которая в методе Бартона

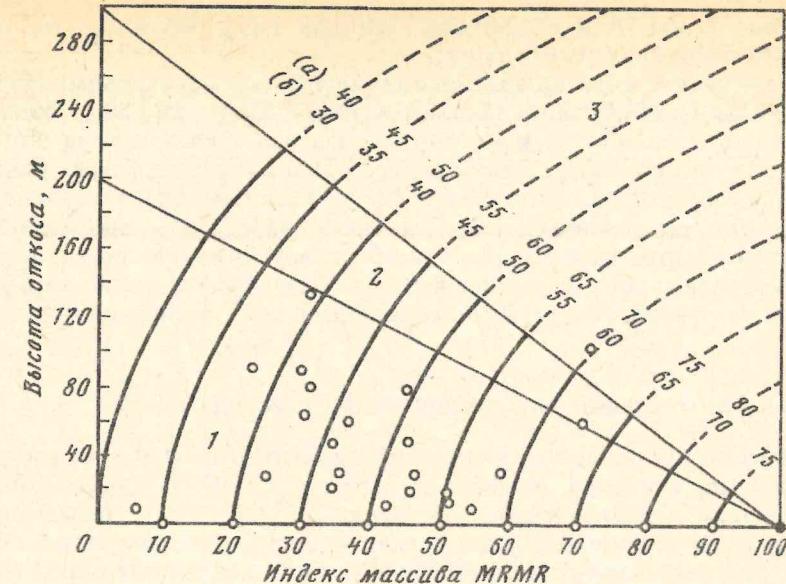


Рис. 3. Выбор угла откоса на основе классификации Хайнеса и Тербрюгге: 1 — область применения классификации, 2 — область ненадежного применения классификации, 3 — область неприменения классификации; *a* — для откосов с коэффициентом запаса 1, 2 и *b* — для откосов с коэффициентом запаса 1,5 [15]

учитывается как «приведенная» ширина (с учетом срока использования и назначения конкретной выработки). Эмпирические классификации также применяют для определения ширины незакрепленного свода подземной выработки (рис. 2) [1]. Все вышеприведенные характеристики помогают предварительно оценить стоимость строительства. Заслуживает внимания классификация Хоммы и Камемуры, приспособленная специально для оперативного контроля строительных работ на основе методов активного проектирования [17].

Несколько позже эмпирические классификации стали применяться для оценки природных склонов и проектирования откосов, при этом классификации Лаубшера [21] и Романы [29] построены на основе классификации Биенявского, а классификации Хайнеса и Тербрюгге [15], Хэка и Прайса [14] — на базе классификации Лаубшера. Эти классификации предназначены для приближенного определения степени устойчивости склона, выбора угла откоса или оптимального типа его укрепления. В них должны учитываться проектные характеристики откосов (высота, коэффициент запаса, срок службы), а также влияние строительных и, в частности, взрывных работ. На рис. 3 приведены диаграммы для выбора угла откоса методом Хайнеса — Тербрюгге с учетом коэффициента запаса и указанием границ применимости этого метода [15]. Использование таких классификаций затрудняется разнообразием механизмов нарушения устойчивости склона (скольжение блока по плоскости, крип, смещение по круглоцилиндрической поверхности, топплинг и т. д.), что, возможно, потребует в дальнейшем уточнения классификаций для различных типов процессов.

Отсутствие надежного аналитического метода оценки эрозионной прочности скального массива в нижнем бьефе гидротехнического сооружения способствовало появлению эмпирических классификаций для прогноза глубины эрозии у окончания водосброса. Примером является классификация Брито, в которой последняя определяется по формуле $d_c = kg^{0,54}H^{0,225}$, где g — удельный расход, H — гидравлический напор и k — коэффициент, зависящий от категории массива [10]. Недостатком подобных классификаций является небольшое количество аналогов,

использованных в них для корреляции классов (или рейтинга) массивов с эрозионной прочностью скальных пород.

Следует отметить и попытки создать классификации для скальных оснований плотин. Применяя классификацию Кикучи, Сайто и Кисуноки [20], можно определить «несущую способность» и «качество» массива с учетом типа плотины и категории пород по прочности. Эти характеристики, которые можно уточнить с помощью экспресс-методов, помогают выбрать тип плотины и глубину съема приповерхностных ослабленных пород, а также определить предварительную стоимость строительства [13]. Поскольку проектирование плотин требует большой точности и надежности, то эмпирические классификации можно пока использовать только на ранних стадиях для предварительной прогнозной оценки оснований.

Опыт применения эмпирических классификаций

Наиболее часто эмпирические классификации используются при строительстве разнообразных туннелей, подземных ГЭС и ГАЭС, а также подземных хранилищ топлива и радиоактивных отходов. Так на участке подземной ГЭС Сирата (Индонезия) с помощью классификации Биеняевского изучались свойства и проведено районирование массива вулканогенно-осадочных пород ($RMR = 55-72$) с ослабленными тектоническими зонами ($RMR = 18-28$). На участке подземной ГЭС Бланда в Исландии использовалась классификация Бартона для определения деформационных свойств базальтов и соответствующего районирования [33]. При проектировании крепления и прогнозе условий горных работ на подземных ГЭС Аренозо (Доминиканская Республика) и Мингтан (Тайвань) применялись обе эти классификации одновременно. В гранитоидах на участке ГЭС Аренозо были выделены сохранные (1–2 классы по RMR , $Q = 6-20$), средней сохранности (3 класс по RMR) и слабо сохранные (4–5 классы по RMR , $Q = 0,02-3$) категории массива. При этом установлены следующие соотношения рейтинга, выделенных категорий пород с результатами геофизических исследований: сохранные породы — $V = 3,1-3,6 \text{ км/с}$; средней сохранности — $V = 2,2-2,8 \text{ км/с}$ и слабо сохранные — $V = 2,0 \text{ км/с}$ [28]. В осадочных породах на участке ГЭС Мингтан были выделены слабо трещиноватые ($RMR = 63-75$, $Q = 12-39$), трещиноватые ($RMR = 55-60$, $Q = 7-13$) разности и зоны тектонических нарушений ($RMR = 10-33$, $Q = 0,1-1,1$) [22]. Исследования докембрийских гранитов на участке подземной лаборатории Рода Стен (Швеция) были проведены с применением классификации Бартона и Биеняевского. Сравнение полученных результатов подтвердило выведенную Биеняевским зависимость $RMR = 9 \ln Q + 44$, отмечаемую для многих объектов [16, 31].

Примерами успешного использования эмпирических классификаций при проектировании подземных хранилищ газа, жидкого топлива и др. являются пять крупных камер во Франции объемом до 1,6 млн. м³, описанных В. Маури [24]. Устойчивость их стенок прогнозировалась на основе классификации Бартона с дополнительным учетом влияния различных вариантов нагружения — разгрузения, в том числе для случаев быстрого опорожнения камер. Для хранилищ разогретой тяжелой нефти учитывались также термические напряжения.

При строительстве железнодорожных и автодорожных туннелей с поперечным сечением 30–60 м² в юрских сланцах долины р. Суза (Италия) было проведено сравнение расчетных характеристик временного крепления, полученных на основе различных эмпирических классификаций, с фактическими значениями [32]. Результаты такого сопоставления показывают для данных условий большую точность классификации Бартона по сравнению с методом Биеняевского (рис. 4). Районирование трассы 8-километрового туннеля Фронхас (Португалия) и проектирование его временного крепления осуществлялось с помощью классификации Биеняевского [26]. Сравнение расчетных характеристик с результатами документации пройденного туннеля, приведенное в табл. 4, указывает на

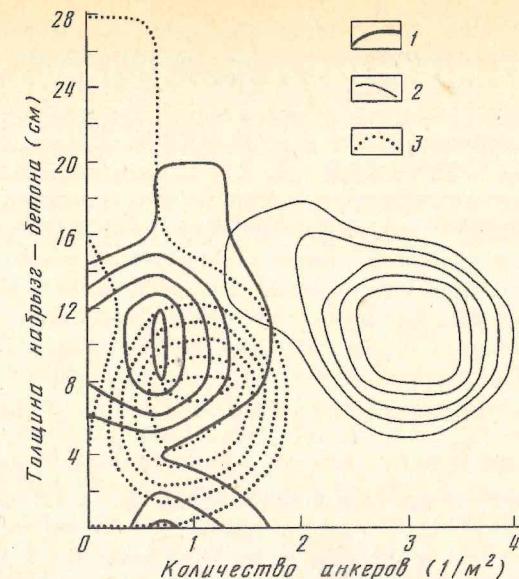


Рис. 4. Сравнение прогнозных характеристик временного крепления транспортных туннелей в долине р. Суза, рассчитанных на основе классификации Биеняевского (1) и классификации Бартона (2) с фактическими значениями (3) [32]

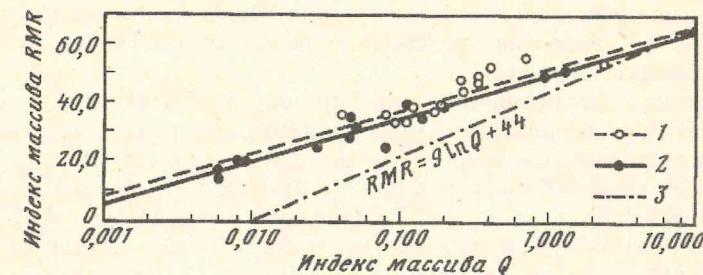


Рис. 5. Сравнение прогнозных (1) и фактических (2) параметров «качества» массива, определенных на основе классификаций Биеняевского (RMR) и Бартона (Q) на участке туннеля Пен и Клип [5]; (3) – зависимость $RMR = 9 \ln Q + 44$, установленная Биеняевским [16]

их близость. Исключение составляют слабые породы 4 класса, которых оказалось примерно в 2 раза меньше. При проектировании туннеля Пен и Клип (Великобритания) длиной 930 м в массиве палеозойских микродиоритов использовались классификация Бартона и классификация Биеняевского, модифицированная Аль-Хартхи и Хенчером для прогнозирования прочности массива и длительности устойчивого состояния незакрепленного туннеля [5]. Обращает внимание хорошая корреляция результатов, полученных различными эмпирическими методами (рис. 5).

Известны случаи использования эмпирических классификаций и при подземной разработке полезных ископаемых. Так, на золоторудных месторождениях Фазенда Бразилейро и Саламангоне (Бразилия) успешно применялась классификация Биеняевского для геотехнического районирования скальных массивов, определения модуля деформации и прочности пород на растяжение [27]. На медно-колчеданном месторождении Невес Корво (Португалия) эмпирическими классификациями воспользовались для прогноза безопасности

Таблица 4

«Качество» массива филлитов и объем временного крепления в туннеле Фронхас по прогнозным расчетам на основе классификации Биеняевского и по фактическим замерам

| Классы массивов (по RMR) | Содержание классов (от общей длины туннеля), % | | Содержание участков с временным креплением (от общей длины туннеля), % | |
|-----------------------------|--|-------------|--|-------------|
| | расчетное | фактическое | расчетное | фактическое |
| I | 27 | 33 | 0 | 0 |
| II | 30 | 32 | 0 | 0 |
| III | 20 | 18,6 | 2 | 1,7 |
| IV | 13 | 6,2 | 13 | 6,2 |
| V | 10 | 10,2 | 10 | 10,2 |

горных работ и для выбора максимальной ширины незакрепленного свода подземных выработок. Расчет по методу Лаубшера ($ARMR = 46$) показывает, что существенное ослабление свода начинается здесь при ширине свода выше 24 м, а при ширине 69 м происходит катастрофическое обрушение. По расчету Мэтью, крупные вывалы начинаются при ширине незакрепленного свода более 27 м, а его обрушение — при 36 м. По методу Бартона ($Q = 34$) максимальная ширина незакрепленного свода постоянно действующей выработки составляет 27 м. Таким образом, все три метода показали близкие результаты, указывающие на необходимость применения в данных условиях анкерного крепления при ширине свода более 24—27 м, что несколько превышает результаты расчетов методом численного моделирования (20 м) [11].

Эмпирические классификации для оценки устойчивости склонов и проектируемых откосов используются еще сравнительно редко. В Испании известно применение классификации Хэка и Прайса для оценки устойчивости 140 автодорожных откосов высотой 5—50 м в районе Фалсет [14], а также классификации Романы при проектировании более 70 дорожных откосов. Хорошее совпадение с действительностью получено при строительстве откосов автодороги высотой до 42 м в Торрагоне, а также для откосов высотой до 35 м в карьере строительного камня вблизи гавани Картагены [29]. В Южной Африке для оценки устойчивости откосов использовалась классификация Лаубшера. Запроектированные с ее помощью откосы в автодорожных выемках глубиной до 20 м совпали в среднем с результатами обычных аналитических расчетов. Максимальные отклонения для отдельных откосов составили менее 4° при коэффициенте запаса 1,2. Применение этой классификации в одном центральноафриканском карьере для определения расчетных откосов высотой около 180 м показало соответствие фактическим, сформировавшимся через 3 года после окончания их строительства, несмотря на весьма неоднородное строение массива, сложенного докембрийскими сланцами, доломитами, песчаниками и кварцитами [15].

Для скальных оснований плотин эмпирические классификации имеют пока ограниченное применение, связанное прежде всего с районированием и предварительной оценкой свойств массива. При проектировании арочной плотины Сегунда Ангостура (Аргентина) высотой 67 м, построенной на андезитах, использовались классификации Диры, Хвонга, Биеняевского и Бартона. С их помощью были получены качественные характеристики геомеханических свойств основания арки, проведено его районирование и определена предварительная стоимость строительных работ [13]. На участке арочной плотины Альто Линдозо (Португалия) высотой 110 м применялись классификации Биеняевского и Бартона, позволившие определить деформационные и прочностные свойства массива слюдистых сланцев и расчленить основание плотины на 3 зоны. Полученные с

помощью этих классификаций высокие значения модуля деформации в первой и второй зонах дали возможность рекомендовать уточнение свойств массива полевыми опытами лишь в третьей зоне ослабленных пород, имеющих локальное распространение [23]. При проектировании небезызвестной китайской плотины «Три ущелья» была специально разработана и использована для районирования данного участка классификация $TG-YZP$, имевшая большое практическое значение в связи с большими размерами и неоднородностью ее основания [35].

На участке проектируемой плотины Котешвар (Индия) использовалась классификация Биеняевского для приближенной оценки деформационных и прочностных свойств докембрийских филлитов, слагающих основание бетонной гравитационной плотины высотой 100 м. Причем для пород зоны B, являющейся непосредственным основанием плотины, получены следующие значения геомеханических характеристик: модуль деформации 6400—8500 МПа; прочность на сжатие 2,9 МПа; $\text{tg } \varphi = 1,12$; $C = 0,56$ МПа, а для пород зоны C: модуль деформации 8500—11 300 МПа; прочность на сжатие 3,4 МПа; $\text{tg } \varphi = 1,17$ и $C = 0,63$ МПа. По результатам полевых опытов в зоне B модуль деформации (по второму циклу нагружения) равен 5400—9170 МПа, $\text{tg } \varphi = 0,82—2,14$ и $C = 0,02—1,75$ МПа. Применение классификации Кикучи и др. для геотехнического районирования гранитных оснований плотин Нагавадо и Огучигава (Япония) способствовало выбору проектных решений по оптимальной глубине съема выветрелых пород и по выборочному укреплению оставленных более сохранных пород. При этом учитывалось различное воздействие гравитационного типа плотины на разные участки основания. Так, для плотины Огучигава в русле, где происходит максимальное нагружение основания, была запроектирована его зачистка до пород класса C, а в верхних частях примыканий, характеризующихся минимальной нагрузкой от плотины, намечалась зачистка только пород класса E [20].

Заключение

Быстро развивающиеся методы эмпирических классификаций представляются наилучшими из всех способов использования огромного накопленного опыта проектно-изыскательских и строительных работ в скальных породах. Неточность непосредственного пересчета геологических параметров в геомеханические свойства массива здесь компенсируются большим объемом исследуемого пространства, дешевизной и быстротой исследования.

В этих методах заложены большие возможности по совершенствованию методики инженерно-геологических изысканий и, в частности, по оптимизации геомеханического опробования. Представляется целесообразным завершать камеральную обработку материалов крупномасштабного картирования, документации разведочных скважин и подземных выработок обязательным пересчетом геологических параметров с помощью эмпирических классификаций в свойства массива с соответствующим районированием. Это улучшит инженерно-геологическое моделирование массива и его опробование, ограничив последнее только контролем и уточнением полученной ранее приближенной оценки геомеханических свойств.

Большие перспективы этих методов связаны с совершенствованием комплекса проектно-изыскательских работ в целом благодаря их возможностям, позволяющим принимать проектные решения по геологическим параметрам, минуя обычные расчеты и игнорируя незнание масштабного фактора. Развитие этого принципиально нового направления в проектировании, отличного от аналитических расчетов и численного моделирования, вызовет повышение роли и ответственности геолога в проектировании.

Главным недостатком эмпирических классификаций остается пока еще недостаточная надежность, требующая определенной осторожности при их использовании. Однако уже в настоящее время вполне оправдано их применение на

небольших объектах, на которых нельзя проводить детальные изыскания и сложные расчеты, а также на начальных этапах проектирования крупных сооружений. Особенно целесообразно их использование при невозможности проведения по тем или иным причинам полевых геомеханических опытов и при отсутствии точных методов расчета, как, например, определение глубины эрозии возле окончания водосброса и др.

Все вышесказанное требует изменить наше отношение к методам эмпирических классификаций, ускорить их разработку и внедрение в практику. При этом в первую очередь следует обеспечить стандартизацию описаний геологических параметров в обнажениях, горных выработках и керне разведочных скважин. Форма описаний должна быть пригодна к автоматизированному пересчету геологических параметров в геомеханические свойства массива. При дальнейшем совершенствовании этих методов следует использовать разные наборы и «взвешенность» параметров для различных инженерно-тектонических условий, различных типов сооружений и различных задач проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартон Н. Проектирование подземных сооружений в скальных породах с использованием Q-системы и программы ИДЕС-ВВ//Энерг. стр-во. № 86. 1992. С. 11—17.
2. Бол X. Классификация скальных массивов//Введение в механику скальных пород. М.: Мир, 1983. С. 159—183.
3. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982. С. 51—55.
4. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. М.: Госстрой СССР, 1988. 48 с.
5. Al-Harthi A. A., Hencher S. R. Modelling stability of the Pen-Y-Clip Tunnel//UK. Eurock'93, Ribeiro e Sousa and Grossmann (eds). V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 451—459.
6. Angelidis C., Konstantakis I., Zakas M. Contribution to the modelling of a new classification system of rock mass, concerning superficial works//Eurock'93, Ribeiro e Sousa and Grossmann (eds). V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 461—466.
7. Antunes S., Infant N. Erosion masses subject to flow action: Some geomechanical and hydraulic aspects//Int. Congr. Eng. Geol. Buenos Aires, 1986, Balkema, Post Congress Vol.
8. Barton N. Characterising rock masses to improve excavation design//Proc. IV Int. Congr. IAEG. India, New Delhi, V. IX. 1982.
9. Bieniawski Z. T. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications//Proc. IV ISRM. V. 2. Montreux, 1979. P. 41—48.
10. Brito S. et al. Studies of erosion processes downstream of concrete spillways//Proc. VII. Int. Congr. on RM. Aachen. V. 2. 1991. Balkema. P. 1261—1266.
11. Caupers D. J. D., Guerreiro L. F. P., Salvador A. J. A., Hepworth N. Design of stopes at Neves Corvo, Portugal//Eurock'93/Eds Ribeiro e Sousa, Grossman. V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 499—507.
12. Clerici A. Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses — Case histories//Eurock'93/Eds Ribeiro e Sousa and Grossmann. V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 509—517.
13. Di Salvo C. A. Geomechanical classification of the rock mass at Segunda Angostura dam, Limay river, Argentine Republic//Trans. of the XIV ICOLD. V. 2. 1982. Q. 53. R. 30. P. 519—530.
14. Hack H. R. G. K., Price D. G. A rock mass classification system for the design and safety analysis of slopes//Eurock'93/Eds Ribeiro e Sousa and Grossman. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 803—810.
15. Haines A., Terbrugge P. J. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems//Proc. VII Congr. of ISRM, Aachen. V. 2. Balkema, Rotterdam, 1991. P. 887—892.
16. He J., Lindblom U. Rock mechanical evaluation at Roda Sten//Eurock'93, Ribeiro e Sousa and Grossmann (eds). V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 561—568.
17. Homma N., Kamemura K. Observational methods on large underground structures//Proc. of the Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, China, 1986. P. 959—965.
18. Hwong Ting-cheng. Classification of the rock mass structures and determination of rock mass quality//Bull. IAEG. N 18. Krefeld. 1978. P. 139—142.
19. Kendorski F. S., Cummings R. A., Bieniawski Z. T., Skinner E. H. Rock mass classification for block caving mine drift support//Proc. 5th Int. Congr. on Rock Mech. ISRM, Melbourne, 1983. Section B.
20. Kikuchi K., Saito K., Kusunoki K. Geotechnically integrated evaluation on the stability of dam foundation rocks//XIV ICOLD. 1982. V. 2. Q. 53. R. 4. P. 49—74.
21. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses — mining applications//Trans. Inst. Min. Metall. 1977. Section. A. P. 86.
22. Lin S. C., Cheng Y., Chung C. T. Design of Mingtan power cavern//RM and Pow. Pl. Balkema, Rotterdam, 1988. P. 199—208.
23. Marques R. Dam foundations on rock masses. The Alto Lindoso dam example. Mechanics of Jointed and Faulted Rock/Ed. Rossmanith. Balkema, Rotterdam, 1990. P. 891—897.
24. Maury V. Utilisation des essais et mesures en laboratoire et in situ dans cinq projets de stockage souterrains//Proc. of IV Int. Congr. on RM, R. 167. Montreux, 1979.
25. Muller L., Rein G. Influence of geological conditions on excavation procedure and support of large rock caverns constructed according to RATM//Proc. of the Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, China, 1986.
26. Neiva J. M. C., Lima C. Engineering geology of the Frouhas tunnel, Portugal//6th Int. IAEG Congress. Balkema, Rotterdam, 1990. P. 2447—2452.
27. Nieble C. M., Brito S. N. A., Fujimura F., Hennies W. T. Rock Mechanics as a support to safety in underground mining//Eurock'93/Eds Ribeiro e Sousa and Grossmann. V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 643—649.
28. Romana M., Estefania S., Cuesta L. Design of Arnoso underground power plant in the Dominican Republic. RM and Power Pl. Balkema, 1988. P. 235—240.
29. Romana M. SMR classification//Proc. VII Int. Congr. on Rock Mech. V. 2. Balkema, Rotterdam, Aachen, 1991. P. 955—960.
30. Spurr K. Energy approach to estimating scow downstream of a large dam//W. P. and D. C. 1985. N 7. P. 81—89.
31. Stojkovic B., Mirio N. Integral design method at the Bekhme Dam Project//Proc. of the 7th Intern. Congr. on RM. V. 1. Aachen, Balkema, 1991. P. 1369—1373.
32. Stragiotti L., Armando E., Barisone G. et al. Essais et auscultations dans la conception et l'execution de quatre tunnels dans le schistes lustres de la vallée de Suse (Italy)//Proc. of IV Int. Congr. on RM. R203. Montreux, 1979.
33. Thorgrimsson S., Loftsson M., Jensson O. Iceland's Blanda Hydroelectric Project. Monitoring of Deformations, Rock Support and Testing of Rock Anchors in the Powerhouse Cavern. Tunnelling and Underground Space Technology. 1991. V. 6. N 2. P. 235—239.
34. Wanhe D., Nianxin X. Collapse of surrounding rock: analysis of mechanism and approach to prediction//Proceedings of analysis of mechanism and approach to prediction//Proceedings of the Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Science Press, Beijing, China, 1986. P. 846—854.
35. Xuecheng Dong. Rock mechanics investigations related to the Three Gorges Dam Project//ISRM News Journal. 1994. V. 1. N 4. P. 6—15.

Гидропроект

Поступила в редакцию
11.V.1994

УДК 550.348.4+551+624

© 1995 г. В. В. АДУШКИН, А. А. СПИВАК, В. М. ОВЧИННИКОВ,
С. П. СОЛОВЬЕВ, В. Г. СПУНГИН

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ МЕГАПОЛИСА

Рассматриваются характерные для мегаполисов геоэкологические факторы, негативно влияющие на человека и его производственную деятельность. Результаты инструментальных наблюдений за параметрами геофизических полей (сейсмическое, электрическое, инфразвуковое) в г. Москве свидетельствуют о значительном влиянии мегаполиса на среду обитания человека. Отмечается сильная пространственная неоднородность геофизических полей в условиях мегаполиса.

Современный этап развития человеческого общества характеризуется весьма сложным взаимодействием техносоциальной системы и окружающей среды. Значительные по масштабам и интенсивности возмущения природной среды, вызванные производственной деятельностью человека, приводят к ухудшению среды его обитания. При этом отрицательное воздействие на окружающую среду связано не только с прямым ее загрязнением отходами промышленности, инженерной и жизнеобеспечивающей деятельности, но также — нарушением режимов внутреннего и внешнего энергообменов в геофизической среде. Последнее проявляется в виде изменения привычных режимов деформирования геологической среды, изменения режима подземных и грунтовых вод, а также — аномальных вариаций геофизических полей (сейсмических, электрических и др.).

В наиболее концентрированном виде негативное воздействие человека на среду обитания проявляется в мегаполисах — административных центрах и больших городах с развитым промышленным производством [2—4, 7, 8]. Специфическое воздействие города на геологическую среду и геофизические поля связано со строительством и эксплуатацией крупных зданий и сооружений, транспорта, разнообразными вибровоздействиями, использованием мощных электроустановок и электрооборудования, коммуникаций разного назначения и т. п.

Высокие нагрузки на геологическую среду со стороны зданий и сооружений, резкое (по сравнению с геологическими временами) изменение ее структуры и напряженно-деформированного состояния в результате наземного строительства и освоения подземного пространства вызывают интенсивные деформационные процессы грунтово-скального основания города. Неоднородность скального основания, проявляющаяся в виде блочной структуры, вертикальные движения которой характеризуются разнонаправленным смещением отдельных блоков (рис. 1), усложняет геоэкологическую ситуацию вследствие концентрации деформации вблизи границ структурного раздела. Смещение блоков в условиях мегаполиса наряду с изменением гидрогеологической обстановки ведет к снижению несущей способности грунтов и как следствие — к преждевременному разрушению фундаментов, строительных конструкций, а также коммуникационных сооружений. В частности, изучение пространственного распределения аварий, произошедших на

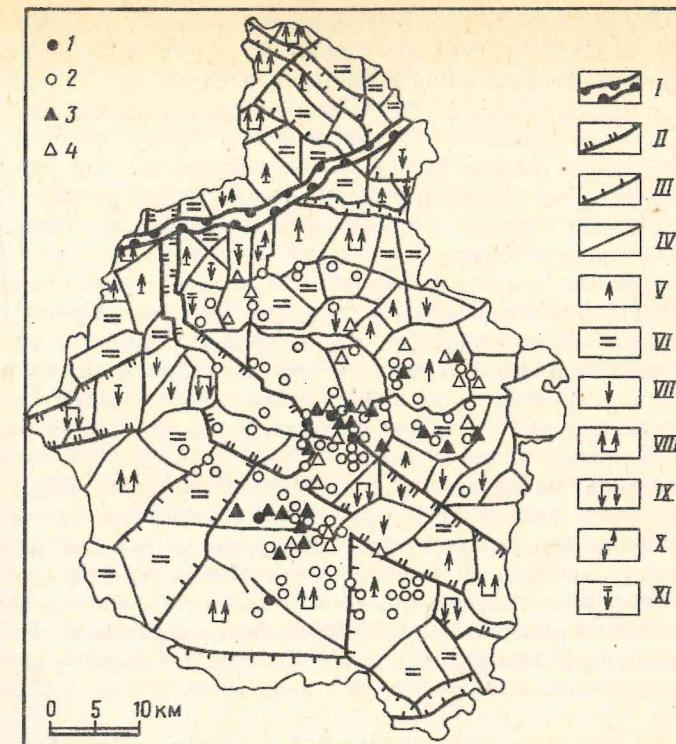


Рис. 1. Схема блочного строения скального основания г. Москвы (по И. Н. Федонкиной). Зоны структурных разделов: I — 4-го порядка, II — 5-го порядка, III — 6-го порядка, IV — 7-го порядка. Тенденции неотектонического развития структур: V — относительное вздымаение, VI — стабильность, VII — относительное опускание, VIII — активное вздымаение, XI — активное опускание, X — инверсия, XI — смена опускания стабильностью. Территориальное распределение экономического ущерба, связанного с повреждением водопроводов (1, 2) и газопроводов (3, 4); экономический ущерб, руб./год на 1 км²: 1 — > 5000; 2 — 2000—5000; 3 — > 500; 4 — 250—500

водопроводах и газопроводах г. Москвы [6], свидетельствует о том, что преимущественно они возникали в окрестности установленных границ структурных блоков (рис. 1). Более подробный анализ показывает, что средняя удаленность участков, на которых зафиксированы аварийные ситуации от ближайшей межблоковой границы a составляет величину $\sim 0,12 L$, где L — средний линейный размер структурного блока. При этом дисперсия относительной величины a/L составляет 0,085.

Снижение аварийности на подземных коммуникационных магистралях связано с изучением динамических характеристик блочной структуры скального основания города и межблоковых промежутков. При этом для выдачи рекомендаций по дополнительной защите подземных коммуникаций на отдельных участках, приуроченных к межблоковым нарушениям, необходимы достоверные знания о степени подвижности блоков и характере их движения.

Геоэкологическая обстановка мегаполиса характеризуется также рядом других негативных факторов, отрицательно влияющих непосредственно на человека и его производственную и интеллектуальную деятельность. Среди них особо выделяются вибрационные (сейсмические) возмущения, возмущения электрического поля в приземном слое атмосферы и шумы звукового диапазона частот. При этом уровень сейсмических колебаний, электрических полей и звуковых возмущений определяется суперпозицией процессов естественного происхождения, характерных для региона в целом, и производственной деятельностью.

Рассматриваемые возмущения геофизических полей оказывают существенное влияние как на самочувствие человека (эмоциональное и психическое), так и на его здоровье (прямое биологически негативное воздействие). Связано это в первую очередь с тем, что в результате долгой эволюции человек приспособился к вполне определенным условиям обитания, в том числе постоянно присутствующим механическим и геофизическим воздействиям на свой организм. Любые, даже кратковременные отклонения геофизических полей от естественного уровня, а также нарушение привычного режима их изменения во времени приводят к ухудшению самочувствия человека.

Сложность описания влияния геофизической среды на человека связана, во-первых, с недостаточной изученностью геофизических полей в местах компактного проживания людей, а во-вторых, с чрезвычайно трудно уловимым современными методами исследований откликом высокоорганизованных биологических организмов на подобные внешние возмущения. Длительные медико-биологические исследования реакции человеческого организма на внешние воздействия разной природы связаны, как правило, с определением допустимого уровня геофизических полей в условиях профессиональной деятельности. Полученные таким образом рекомендации не всегда приемлемы в повседневной жизни. К примеру, если человек испытывает кратковременный дискомфорт при колебаниях своего дома, вызванных движением поездов на малозаглубленных участках метрополитена, его эмоционально-психическое состояние ухудшается, даже если максимальная экспозиция не превышает норм, установленных Международной организацией по стандартизации (ИСО). Все это говорит о настоятельной необходимости изучения геофизических полей в условиях больших городов и мегаполисов.

Следует особо отметить, что наряду с воздействием на человеческий организм аномальные возмущения геофизических полей оказывают влияние на работу высокоточной техники и тонкие технологии: физико-химические процессы и механические операции при производстве электронных элементов и устройств, прецизионные операции в оптико-механическом производстве, проведение металлографических измерений. Здесь велика роль техногенных сейсмических колебаний, уровень которых необходимо контролировать как при организации особо точного производства, так и при выборе мест строительства и проведении контроля за безопасной эксплуатацией ответственных объектов повышенного риска (мосты, эстакады, экологически вредные производства), а также сооружений, представляющие историческую ценность.

Весьма ощутимы неблагоприятные последствия возмущений естественного электрического поля атмосферы и инфразвуковых воздействий. Первые, помимо прямого биологического воздействия на организм человека [12], способствуют значительному ускорению электрохимических процессов, что приводит, например, к снижению коррозионной стойкости металлических конструкций. Инфразвуковые возмущения с частотой 6–8 Гц оказывают в высшей степени негативное влияние на эмоциональное и психическое состояние человека [1]. Особенно опасен инфразвук амплитудой более 6,3 Па.

Дополнительно следует отметить особую значимость градиента потенциала электрического поля как характеристики загрязненности воздуха [5]. Изменения в составе приземного слоя атмосферы (химический состав, повышенное пылевосодержание, наличие твердых и жидкых аэрозолей), вызванные интенсивной производственной деятельностью и работой транспорта, оказывают существенное влияние на разделение и перенос электрических зарядов. Снижение проводимости атмосферы в приземном слое в результате техногенных возмущений приводит к увеличению средних значений градиента потенциала и как следствие — к увеличению вертикальной составляющей напряженности электрического поля E .

В связи со сказанным представляет значительный интерес организация и проведение постоянных и режимных инструментальных наблюдений за основ-

ными геофизическими полями на территории мегаполиса. Основная цель таких исследований, развернутых в Институте динамики геосфер Российской академии наук (ИДГАН), — определение величины и характера возмущений, вносимых в геофизические поля мегаполисом как энергоемкой геофизической системой; установление основных источников техногенных воздействий.

Получаемые при этом данные необходимы при геоэкологическом ранжировании районов города и отдельных его участков, а также при разработке мер, направленных на снижение отрицательного воздействия возмущенной геофизической среды на человека и результаты его производственной деятельности.

В настоящей работе изложены результаты контроля геофизических полей в г. Москве — типичном мегаполисе. Основные задачи, сформулированные на первом этапе исследований, были связаны с: 1) разработкой концепции комплексного контроля геофизической среды в условиях высоконеоднородных, значительных по амплитуде техногенных воздействий; 2) определением значимых пространственных и временных вариаций геофизических полей, обусловленных влиянием мегаполиса; 3) установлением корреляционных связей между техногенными составляющими разных геофизических полей, а также уровнем и характером техногенных возмущений и естественными характеристиками геофизической среды (например, метеопараметрами).

Это определило специфику экспериментальных исследований и основные подходы к решению поставленных задач. С целью установления общих закономерностей техногенного влияния мегаполиса на природную среду на первом этапе исследований проводилась регистрация наиболее сильно влияющих на человека геофизических полей в стационарном пункте, расположенному в г. Москве и на значительном (~ 100 км) удалении от города (район пос. Михнево Московской обл.). Одновременно проводилась выборочная регистрация тех же геофизических полей на разных участках города с помощью специально разработанного мобильного комплекса.

Схема центрального пункта геоэкологического контроля обсерваторского типа, размещенного на территории ИДГАН (район Ленинского проспекта), представлена на рис. 2. В процессе проведения инструментальных наблюдений использовалась аппаратура, хорошо зарекомендовавшая себя при долговременных полевых измерениях. Так, регистрация микросейсмического фона (в диапазоне 0,5–50 Гц) осуществлялась сейсмоприемниками СМ-ЗКВ, установленными на специально выполненных постаментах, а также набором акселерометров с предусилителями фирмы Брюль и Кьер. Выбор амплитудно-частотной характеристики регистрирующих каналов осуществлялся с помощью блока формирования характеристики БФХ-ДСМ, обеспечивающего полосовую фильтрацию в нескольких диапазонах частот.

Вертикальная составляющая напряженности электрического поля E и ее вариации в диапазоне частот 0–200 Гц регистрировались измерителем напряженности электрического поля ИНЕП (электростатический генератор, переменное напряжение на выходе которого пропорционально напряженности внешнего электрического поля). Вариации напряженности электрического поля величиной до 480 В/м (при чувствительности прибора 0,1 В/м) в частотном диапазоне 0,001–10 кГц фиксировались стационарным измерителем вариаций электрического поля СИВЭП антенного типа.

Для изучения инфразвуковых акустических колебаний использовались две измерительные системы. Первая из них представляла собой набор полудюймовых микрофонов фирмы Брюль и Кьер, предусилитель 2619 и источник питания 2807. Система позволяла определять звуковое давление в диапазоне частот 0,5–18 000 Гц с микрофоном 4147 и в диапазоне частот 4–25 000 Гц с микрофоном 4134. Калибровка измерительного тракта проводилась с помощью пистофора 4220.

Основой второй системы акустических измерений является микробарограф

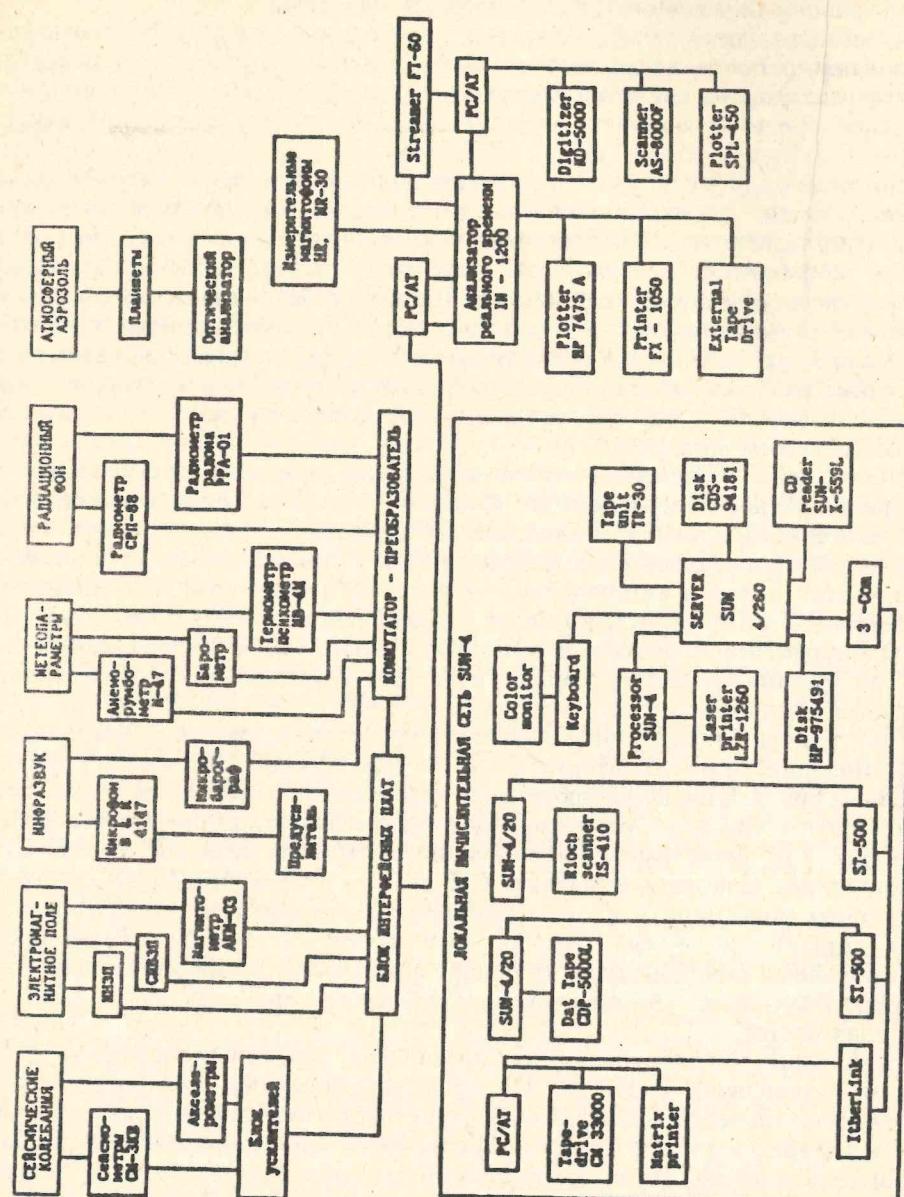


Рис. 2. Схема Центрального пункта геоэкологического контроля ИГАН

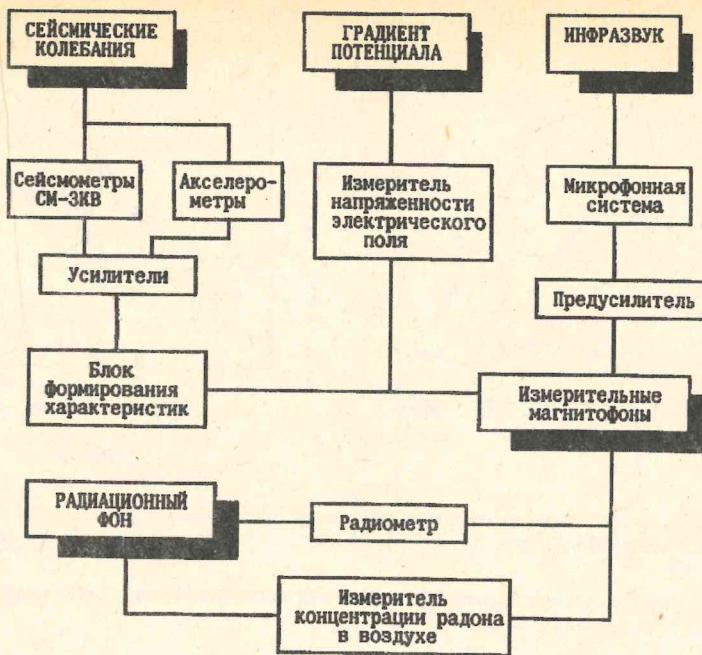


Рис. 3. Схема мобильного комплекса геоэкологического контроля мегаполисов

К-354-А, осуществляющий регистрацию звукового давления в диапазоне частот 0,003—10 Гц.

Выделение инфразвуковой составляющей в нужной полосе частот (например, 5—10 Гц) осуществлялось аппаратным путем (использование высокодобротных полосовых фильтров) либо программными средствами на стадии обработки полученных записей.

Радиационные измерения выполнялись с помощью радиометра СРП-88Н (γ -фон) с собственным фоном 10 c^{-1} , что соответствует значению измеряемой мощности дозы $2,7 \text{ мкР/с}$, и измерителя концентрации радона в воздухе РРА-01.

Для полноты информации о состоянии окружающей среды проводилась регистрация метеопараметров: атмосферного давления, влажности и температуры воздуха, направления и скорости ветра.

Сбор и хранение данных инструментальных наблюдений осуществлялся с помощью измерительных 7-канальных магнитофонов HR-30E и MR-30 (фирма TEAC, Япония). Дальнейшая обработка и анализ полученной информации проводились в цифровом виде с использованием анализатора реального времени IN-1200 (Франция), ПЭВМ PC/AT 286/287, а также локальной вычислительной сети SUN-4 (рис. 2).

Схема автономного мобильного комплекса оперативного геоэкологического контроля г. Москвы представлена на рис. 3 (комплекс размещен в микроавтобусе УАЗ). При проведении оперативного контроля использовались те же средства регистрации, что и в случае стационарных измерений. Сбор данных осуществлялся на портативные магнитофоны HR-30E. Обработка экспериментального материала проводилась в стационарных условиях.

Микросейсмические колебания. Колебания грунтового и скального оснований мегаполиса имеют сложную структуру. Фоновые колебания (участки микросейсмической записи с минимальной статистически представительной амплитудой в выбранном временном интервале) перемежаются с сейсмическими возмущениями разного происхождения: короткими импульсами длительностью 1—2 с

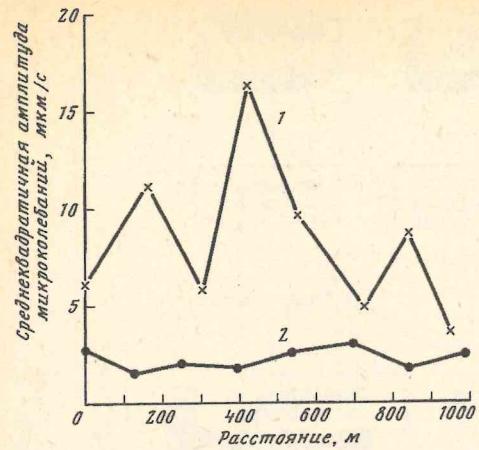


Рис. 4

Рис. 4. Пространственная изменчивость среднеквадратичной амплитуды микроколебаний в г. Москве: 1 — ул. Маршала Бирюзова (08.06.93; 10 : 30—11 : 30 МСК); 2 — район Останкинского парка (09.06.93; 11 : 00—11 : 30 МСК)

Рис. 5. Изменение среднеквадратичной амплитуды фоновых микроколебаний в течение суток (Ленинский проспект, среднее за период с 14.02.92 по 11.03.92)

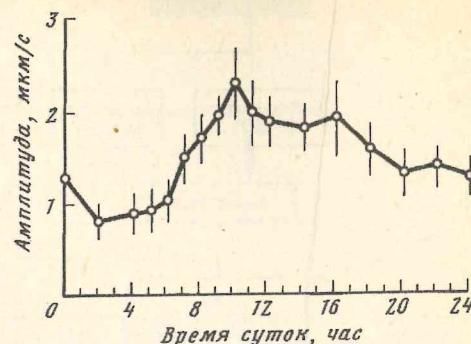


Рис. 5

волнового типа (результат релаксационных процессов, постоянно протекающих в геологической среде) и протяженными во времени возмущениями (от 10 до сотен секунд), вызванными движением транспорта либо работой механизмов и оборудования (к ним естественно относятся также сейсмические колебания от землетрясений). При этом следует отметить, что фоновые микроколебания, характеризующие собственные колебания блочной среды как некоторой колебательной системы, в свою очередь представлены двумя составляющими: нерегулярной (отклик блочной среды на внешние силовые и кинематические возмущения) и детерминированной (возмущения от регулярных источников техногенного происхождения). В первом приближении случайную и детерминированную составляющие можно разделить частотной фильтрацией с помощью высокодобротного фильтра и определением степени пространственной поляризации колебаний [9].

Характерной особенностью микросейсмических колебаний в условиях мегаполиса является сильная пространственная изменчивость их амплитудных характеристик. Как это видно из данных, представленных на рис. 4, среднеквадратичная амплитуда колебаний зависит не только от района, в котором проводится регистрация (сейсмически спокойные районы города и районы с интенсивным транспортным сообщением и производством, вызывающие ударные и вибровозмущения), но может существенно изменяться на расстоянии 200—1000 м (особенно в местах расположения наземных и малозаглубленных транспортных коммуникаций, крупных подземных сооружений и пустот, выступающих в роли резонаторов). При этом следует отметить, значительно отличие, во-первых, максимальных амплитуд от средних (до 100 раз) и, во-вторых, амплитудных и частотных характеристик фоновых колебаний и микросейсмического шума в целом (сейсмическая запись, включающая все зарегистрированные колебания) от аналогичных величин, полученных за пределами влияния мегаполиса.

Зависимость амплитуды фоновых микроколебаний грунтового основания от времени суток в районе Ленинского проспекта представлена на рис. 5. Видно, что наиболее интенсивные микросейсмические колебания наблюдаются в дневное время, что связано в основном с техногенной деятельностью.

На рис. 6 приведены спектры мощности микросейсмических колебаний. В

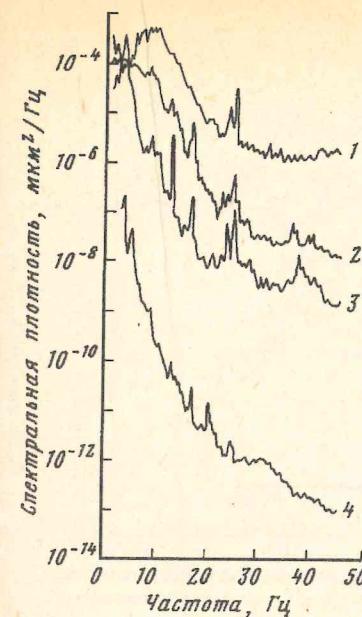


Рис. 6

Рис. 6. Спектральная плотность микросейсмических колебаний: 1 — центральная часть г. Москвы, 2 — Ленинский проспект, 3 — Бирюлево, 4 — пос. Михнево (Московской обл.)

Рис. 7. Спектральная плотность мощности трех компонент микросейсмических колебаний в диапазоне частот 0,5—6 Гц (Бирюлево); компоненты: 1 — восток — запад, 2 — север — юг, 3 — вертикальная

качестве примера рассмотрим спектральную плотность микросейсмических колебаний в Бирюлево. Наблюдения проведены в период с 23 мая по 5 июня 1991 г. в диапазоне частот 0,2—50 Гц. Общая тенденция спектра микросейсмических колебаний (кривая 3) — уменьшение его уровня с увеличением частоты. В частности, в области частот f от 3 до 20 Гц амплитуда спектра мощности изменяется с частотой как

$$|S|^2 \sim f^{-3}.$$

В области частот 20—50 Гц зависимость $|S|^2$ от f существенно более слабая, спад составляет примерно 6 дБ на октаву.

Следует отметить, что спектр мощности осложнен наличием узких спектральных составляющих. Частота указанных квазигармонических составляющих устойчиво сохраняется, а амплитуда отдельных составляющих может изменяться, в некоторых случаях на порядок.

На рис. 7 приведены графики спектров мощности для трех компонент микросейсмического фона в диапазоне 0,5—6 Гц. Особенность указанных данных заключается в подобии изменения спектров мощности с частотой в диапазонах до 1 Гц и свыше 3 Гц. В интервале 1—3 Гц характер изменения спектра мощности для вертикальной и горизонтальных составляющих существенно различен. На горизонтальных составляющих отчетливо виден максимум спектральной мощности на частоте 1,7 Гц. Уровень спектра на вертикальной составляющей примерно на два порядка ниже уровня спектра на горизонтальных составляющих, т. е. на этих частотах доминируют волновые компоненты, поляризованные в горизонтальной плоскости.

Для сравнения на рис. 6 приведен спектр мощности микросейсмических колебаний, зарегистрированных в районе, не подверженном влиянию мегаполиса (пос. Михнево). Так же, как и в случае наблюдений в Бирюлево, можно выделить два

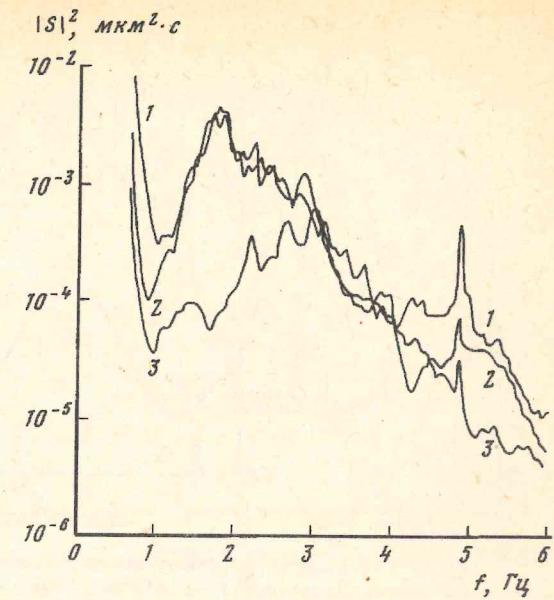


Рис. 7

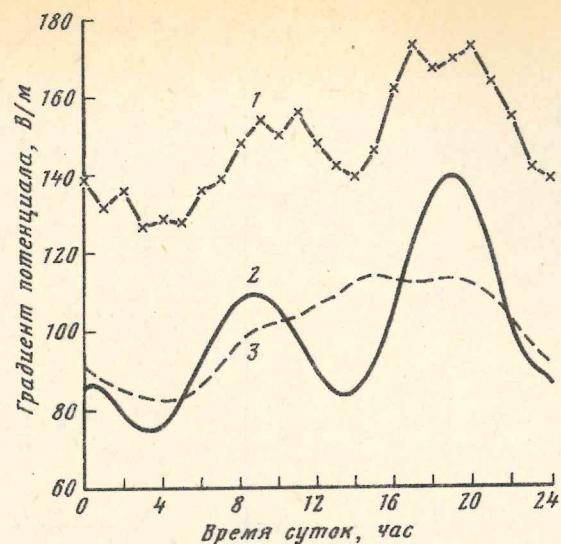


Рис. 8. Суточный ход вертикальной составляющей напряженности электрического поля в условиях мегаполиса: 1 — г. Москва, Ленинский проспект; 2 и 3 — г. Париж (соответственно вблизи земной поверхности и на высоте ~ 250 м)

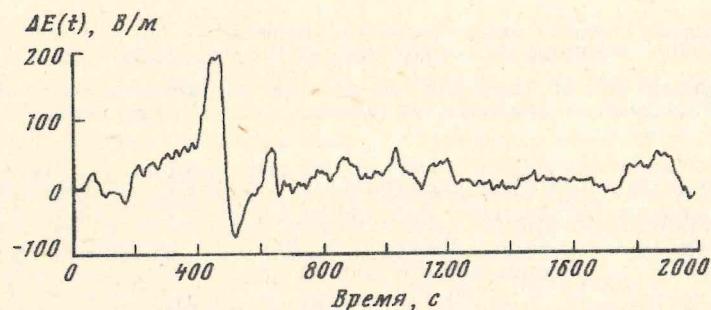


Рис. 9. Изменение вариации напряженности электрического поля ΔE при прохождении грозового облака (Ленинский проспект, 28.05.93; 14 : 28 МСК)

участка, характеризующихся разным изменением спектра мощности от частоты. При этом своеобразной границей является частота 20—25 Гц. Спектр также осложнен присутствием узких спектральных пиков, однако они менее выражены. Уровень всех спектральных составляющих в пос. Михнево по крайней мере в 10^3 раз ниже уровня соответствующих спектральных составляющих в условиях мегаполиса, а на частотах выше 24 Гц они различаются в 10^4 — 10^5 раз.

Особо следует отметить, что при существенных различиях в уровне спектров, полученных в условиях города и за его пределами, квазигармонические составляющие имеют примерно одинаковые относительные превышения над средним уровнем спектра. Это позволяет предполагать, что свойства узких спектральных максимумов определяются в основном свойствами среды.

Итак спектральные оценки микросейсмических колебаний свидетельствуют о том, что микросейсмический фон несет информацию о величине техногенного воздействия на среду. Это проявляется прежде всего в существенном различии уровня отдельных спектральных составляющих.

Для получения абсолютных оценок уровня техногенного воздействия со стороны мегаполиса необходимо проводить синхронные наблюдения в районе, не подверженном его влиянию.

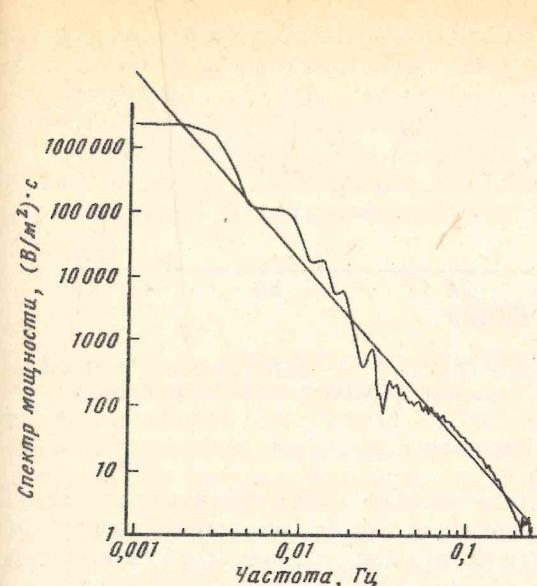


Рис. 10

Рис. 10. Пример спектральной плотности мощности вариации напряженности электрического поля (Ленинский проспект, 12.10.92)

Рис. 11. Согласованное изменение величин ΔE , k и w во времени

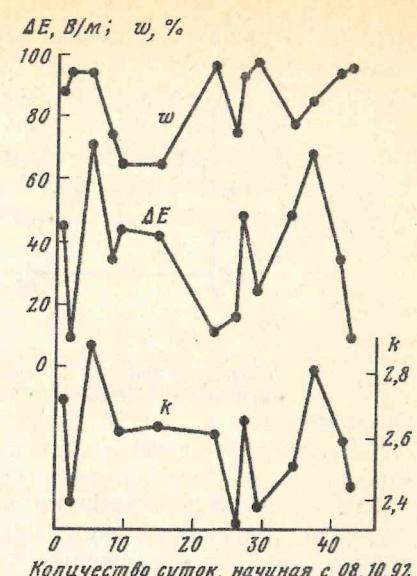


Рис. 11

Сейсмотехногенная загрязненность, создаваемая промышленными предприятиями и городским транспортом и проявляющаяся в виде вибраций зданий, сооружений и вибрационных нагрузках на грунтовые основания, является одной из наиболее важных составляющих общей геоэкологической проблемы крупных городов. И хотя амплитуды виброскоростей, как правило, не превышают 100 мкм/с, что само по себе не вызывает неупругих деформаций, многократно повторяющиеся в течение длительного времени вибонагрузки способны вызывать пластические деформации оснований, а это весьма опасно для размещенных на них сооружений.

Градиент потенциала электрического поля. Величина и характер временных вариаций напряженности электрического поля в условиях мегаполиса определяются, как уже отмечалось, изменениями в составе атмосферы, работой электрооборудования и эксплуатацией электрокоммуникаций. В качестве иллюстрации на рис. 8 приведены суточные вариации вертикальной составляющей напряженности электрического поля E в районе Ленинского проспекта г. Москвы (среднее за 3 сут. августа 1993 г., характеризующихся ясными погодными условиями и низкой влажностью воздуха). На зависимости $E(t)$ отчетливо выделяются два максимума, характерные для условий крупного города (для сравнения на том же рис. 8 приведены результаты измерения напряженности электрического поля в условиях Парижа [10]).

Так же, как и для микросейсмических колебаний, отмечается сильная пространственная изменчивость напряженности электрического поля в условиях мегаполиса. Это связано в первую очередь со сложной конфигурацией эквипотенциальных поверхностей (городская застройка) и наличием мощных локальных источников электрических полей. Дисперсия пространственного распределения амплитуды E в условиях Москвы достигает 100 В/м (для сравнения: вне зоны влияния мегаполиса — около 40 В/м). Несмотря на это, в условиях мега-

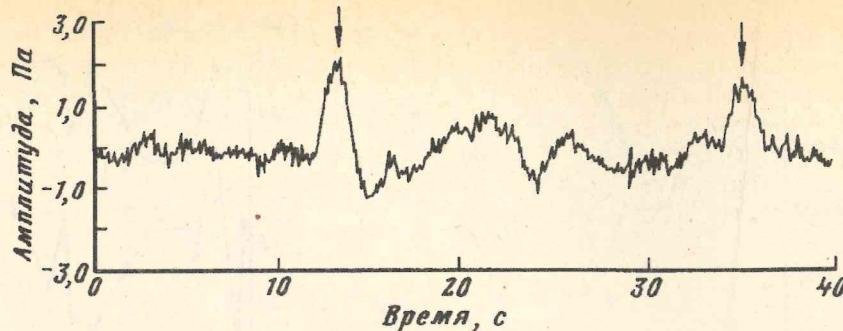


Рис. 12. Уровень инфразвука (проспект Мира, 12.02.92; 14 : 15 МСК); отмечено стрелкой кратковременное повышение амплитуды связано с движением тяжелогруженного авто-транспорта

полиса хорошо регистрируются природные явления электрического характера. В качестве примера на рис. 9 приведен фрагмент записи, демонстрирующий изменение вариации напряженности электрического поля ΔE при прохождении грозового облака (отметим, что характер изменения ΔE во времени аналогичен виду зависимости $\Delta E(t)$ при прохождении грозового облака вне зоны влияния мегаполиса [11]).

Спектр мощности вариаций напряженности электрического поля не имеет ярко выраженных особенностей (рис. 10) и хорошо аппроксимируется степенной зависимостью вида

$$|S|^2 = \text{Const} \cdot f^{-k}.$$

При этом следует отметить хорошую корреляцию параметра k с величиной ΔE (рис. 11).

В отличие от микросейсмических колебаний сложность сопоставления напряженности электрического поля в условиях мегаполиса и вне зоны его влияния заключается в том, что величина E определяется многими параметрами одновременно. Так, наряду с факторами, которые характеризуют отличительные условия мегаполиса (например, запыленность воздуха, состав пылеватых частиц и аэрозольных частиц являются объективными показателями загрязненности воздуха в условиях города), существуют факторы, повсеместно определяющие величину и изменчивость E , — такие, например, как влажность воздуха (отметим, что количество влаги и характеристики ее состояния существенно влияют на плотность объемного электрического заряда и градиент потенциала в воздухе). Измерения показывают, что даже в пределах мегаполиса относительная влажность воздуха и в приземном слое атмосферы для разных его участков может существенно различаться (до 7%). В основном это связано с изменчивостью условий, наличием водоемов, различной облачностью в разных районах города. Это приводит к необходимости учета влияния факторов, несущественных с точки зрения техногенного воздействия. Отметим, что сопоставление вариации ΔE с величиной влажности воздуха демонстрирует хорошую корреляцию указанных величин (рис. 11).

Проведенные исследования показывают, что электрическое поле в условиях мегаполиса заметно выше, чем вне зоны его влияния. Кроме того, по результатам режимных инструментальных наблюдений с помощью мобильного комплекса отмечается наличие в городе участков, характеризующихся непродолжительными по времени (5—10 мин), однако часто повторяющимися (до 3 раз в час) высокочастотными техногенными возмущениями электрического поля значительной амплитуды (в 5—10 раз превышающей фоновые значения).

Инфразвук. Результаты инфразвуковых измерений свидетельствуют о

значительной пространственной и временной изменчивости амплитуды инфразвука в условиях мегаполиса. При этом в дневное время амплитуда инфразвуковых возмущений в городе в 15—60 раз (в зависимости от района и конкретного обследуемого участка) превышает значения вне зоны его влияния.

Следует отметить, что на некоторых участках города интенсивность инфразвука в диапазоне 0,5—20 Гц (рис. 12) значительна, а его амплитуда периодически может достигать 3 Па (движение тяжелогруженного авто- и железнодорожного транспорта).

Выводы

Проведенные исследования демонстрируют значительное влияние мегаполиса на характеристики геофизических полей. Техногенные возмущения геофизических полей мегаполисом имеют комплексный характер. Установление основных значимых факторов, влияющих на человека и его производственную деятельность, возможно на основе проведения комплексных наблюдений за геофизическими полями.

Сравнение характеристик геофизических полей в условиях мегаполиса и в районе, не подверженном его влиянию, позволяет выделить техногенную составляющую. В частности, установлено увеличение вклада техногенной составляющей микросейсмических колебаний с увеличением частоты.

Значительное влияние мегаполиса на уровень и вариации геофизических полей требует проведения более подробных и целенаправленных геоэкологических исследований в крупных городах. Причем ясно, что для решения этого вопроса необходимо привлекать данные медицинского обследования населения.

Опыт проведения геоэкологического контроля в г. Москве подсказывает, что значительная пространственная неравномерность характеристик геофизических полей не позволяет использовать с целью контроля сеть постоянно привязанных к местности пунктов геоэкологической диагностики окружающей среды. Одним из наиболее приемлемых решений проблемы диагностики является использование наряду с одним стационарным пунктом регистрации нескольких мобильных комплексов, позволяющих оперативно проводить измерения в разных точках города. Это дает возможность не только построить карту среднего уровня техногенных возмущений, но при необходимости — провести оценку ситуации на выбранном участке города или производственной территории. Такого рода данные необходимы для выявления мест негативных техногенных воздействий, а также выбора наиболее благоприятных участков для размещения точного производства и разного рода учреждений. Не исключено, что по мере совершенствования системы оценки земельных участков (в частности, в крупных городах) наряду с их расположением относительно центра города будут приниматься во внимание и их геоэкологические характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белановский А. С. Колебательные и акустические процессы в биологии и ветеринарии. М., 1978. 73 с.
- 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.
- Коридалин В. Е., Кузьмина Н. В., Осица В. И. и др. Сейсмические шумы индустриального города // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280. № 5. С. 1094—1097.
- Леггет Р. Города и геология. М.: Мир, 1986. 559 с.
- Махоткин Л. Г. Электрические факторы чистоты воздуха // Тр. ГГО. 1963. Вып. 146. С. 48—52.
- Методические основы оценки техногенных изменений геологической среды городов / Под ред. Г. Л. Коффа, В. И. Осипова. М.: Наука, 1990. 196 с.

7. Осипов В. И. Зоны геологического риска на территории Москвы//Вестн. РАН. 1994. Т. 64. № 1. С. 32—45.
8. Спивак А. А., Адушкин В. А., Овчинников В. М. и др. Геофизические поля в условиях мегаполиса//Докл. РАН. 1993. Т. 332. № 5. С. 641—643.
9. Спивак А. А., Дубиня В. А., Спунгин В. Г. и др. Контроль механического состояния горного массива на основе микросейсмической информации//Контроль состояния скального массива при долговременной эксплуатации крупногабаритных подземных сооружений. Апатиты: Изд. ГОИ КНЦ РАН, 1993. С. 82—98.
10. Тверской П. Н. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеорол. изд-во, 1949. 252 с.
11. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометиздат, 1974. 454 с.
12. Электромагнитные поля в биосфере. Т. 1/Под ред. Н. В. Красногорской. М.: Наука, 1984. 483 с.

Институт динамики геосфер РАН

Поступила в редакцию
11.V.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

2 · 1995

УДК 624.131

© 1995 г. И. С. ПАШКОВСКИЙ, А. А. РОШАЛЬ, Е. ПРАЙНИНГЕРОВА,
З. ВИТТЛИНГЕРОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ КРУПНОЙ ТЭЦ В ВОСТОЧНОЙ ЧЕХИИ

Рассматриваются закономерности формирования подземных вод на территории одного из гидрогеологических районов Восточной Чехии. Показывается, что условия питания и разгрузки подземных вод определяются естественными и техногенными факторами. При оценке защищенности подземных вод от загрязнения важнейшими факторами являются защитная роль почвенного покрова и изменение интенсивности инфильтрационного питания подземных вод. Поскольку при интенсивном водоотборе существенно изменяется глубина залегания уровня грунтовых вод, а следовательно, и интенсивность инфильтрационного питания, то области, в пределах которых в ненарушенных условиях подземные воды были практически защищенными, заметно сокращаются, а вблизи крупных водозаборов они переходят в разряд весьма слабозащищенных. Анализ многолетних наблюдений за качеством грунтовых вод показывает, что под влиянием постоянных выбросов в атмосферу продуктов сгорания ТЭЦ и химической мелиорации почв качество грунтовых вод здесь резко изменилось. Тип подземных вод сменился с гидрокарбонатного на сульфатный. Результаты модельной оценки загрязнения приземного слоя атмосферы диоксидами серы хорошо коррелируются с данными по фактическому содержанию сульфатов в грунтовых водах.

Исследуемая территория расположена в центральной части Восточной Чехии между крупными городами Градец Кралов (на севере) и Пардубице (на юге) на правобережье р. Лаба (эта река ограничивает рассматриваемую территорию на востоке и юге). Общая площадь территории составляет около 185 км². В геоморфологическом отношении этот район в основном приурочен к падолине р. Лабы, ее низким и высоким террасам. Абсолютные отметки местности находятся в диапазоне от 215 (средняя отметка уреза р. Лабы) до 315 м. Местность слаборасчлененная. Многочисленные мелкие притоки р. Лабы носят в основном временный характер. Исключение составляет Опатовицкий канал, который, по сути дела, является спрямлением русла р. Лабы (рис. 1).

В пределах рассматриваемой территории сосредоточены многочисленные промышленные предприятия химической, радиотехнической, строительной, горнодобывающей, пищевой и др. отраслей. Вблизи поселка Опатовице над Лабой расположена мощная тепловая электростанция, обеспечивающая централизованное теплоэнергоснабжение населенных пунктов и предприятий района. Опатовицкая электростанция, как и другие теплоэнергетические объекты территории (включая системы отопления большинства из многочисленных индивидуальных строений), работает на буром угле, добываемом в Северной Чехии. Этот уголь, как известно, характеризуется высоким содержанием серы. Постоянный выброс продуктов сгорания и других соединений привел к тому, что за последние десятилетия загряз-

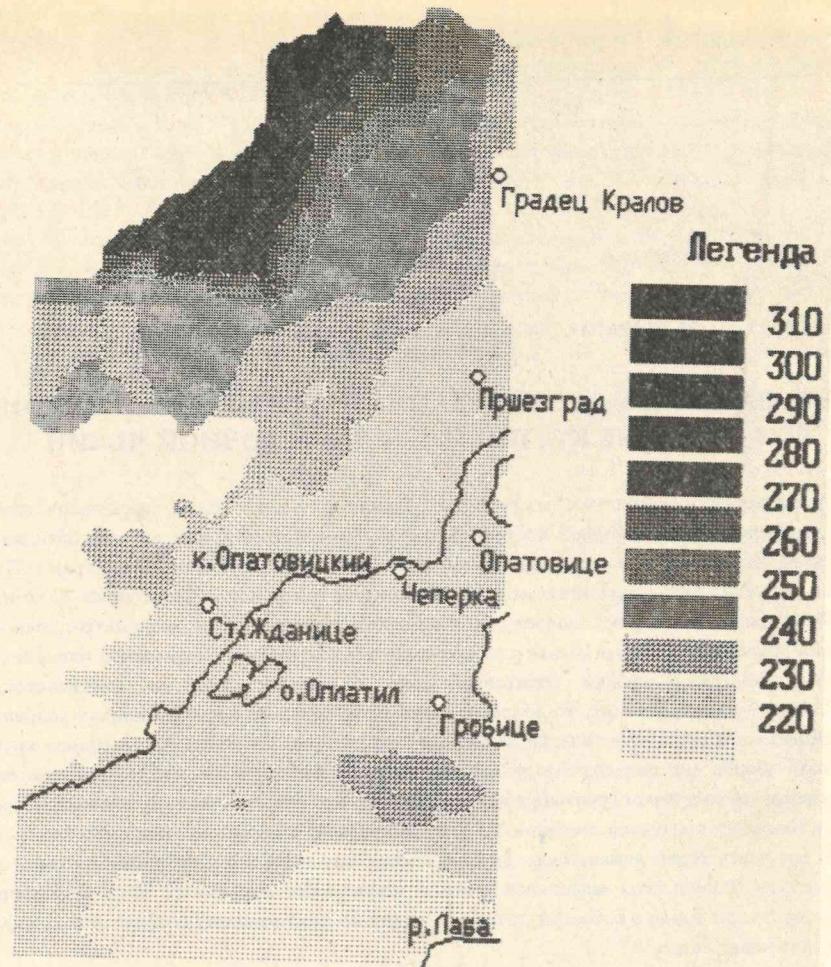


Рис. 1. Схематическая карта рельефа (абсолютные отметки поверхности над уровнем моря, м), масштаб 1 : 150 000

нение атмосферы здесь достигло угрожающих размеров и нормой стало выпадение кислотных дождей.

Район характеризуется также высокоразвитым сельскохозяйственным производством (зерновые культуры, садоводство, овощеводство и особенно животноводство). Здесь применяются интенсивные агротехнические методы, в частности, орошение земледелие за счет использования поверхностных вод Опавицкого канала.

Климат территории — среднеевропейский. Среднемноголетние данные по осадкам и среднемесячной температуре воздуха приведены в табл. 1.

В гидрогеологическом отношении район приурочен в Чешскому меловому артезианскому бассейну. В разрезе выделяются водоносные горизонты четвертичных и меловых отложений. Относительным водоупором между ними служит регионально выдержанная толща мергелисто-глинистых отложений верхнего тура.

Четвертичный водоносный горизонт является одним из основных источников

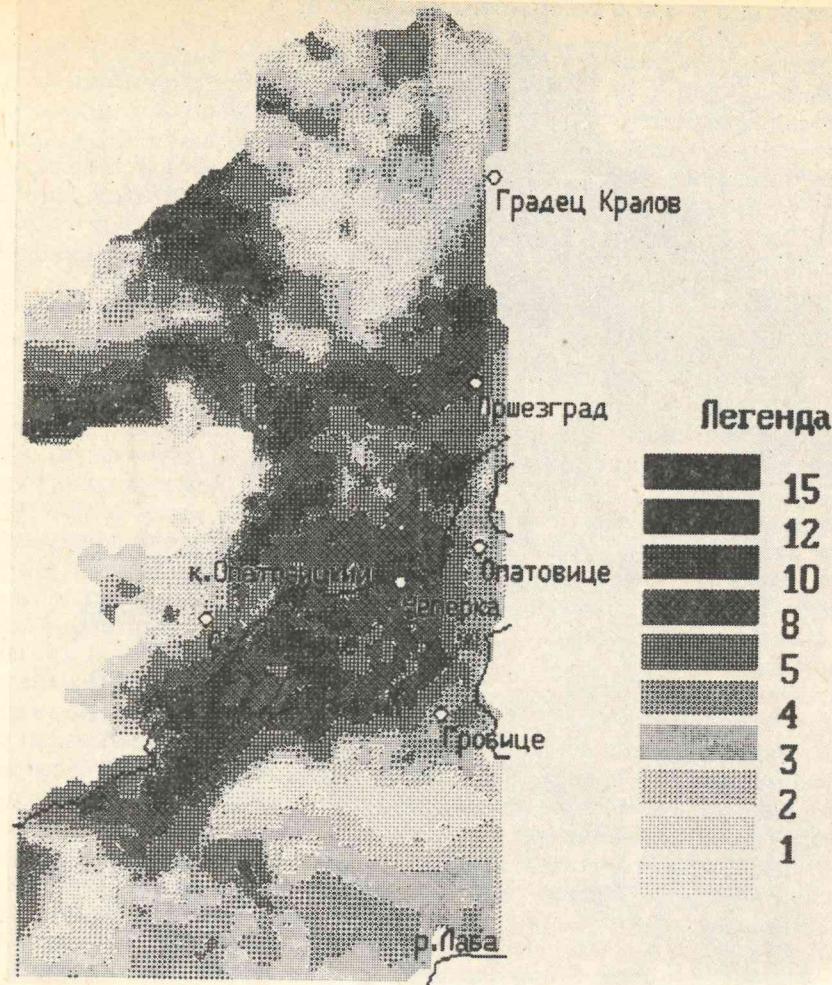


Рис. 2. Модельная карта мощностей четвертичного водоносного горизонта (м), масштаб 1 : 150 000

хозяйственно-питьевого водоснабжения. Здесь эксплуатируется крупный скважинный водозабор сифонного типа «Гробице-Чеперка» и поверхностный водозабор на оз. Оплатил, которое представляет собой отработанный карьер строительного материала. Местное водоснабжение также осуществляется за счет эксплуатации одиночных скважин и колодцев, каптирующих четвертичный водоносный горизонт.

Таблица 1

Среднемноголетние климатические данные

| Месяц | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Год |
|-------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|
| Осадки, мм | 40 | 32 | 34 | 43 | 58 | 65 | 78 | 70 | 48 | 47 | 44 | 43 | 602 |
| Температура воздуха, °C | -2,1 | -1,0 | 2,7 | 7,4 | 12,8 | 15,6 | 17,4 | 16,8 | 13,5 | 8,3 | 3,1 | -0,4 | 7,8 |

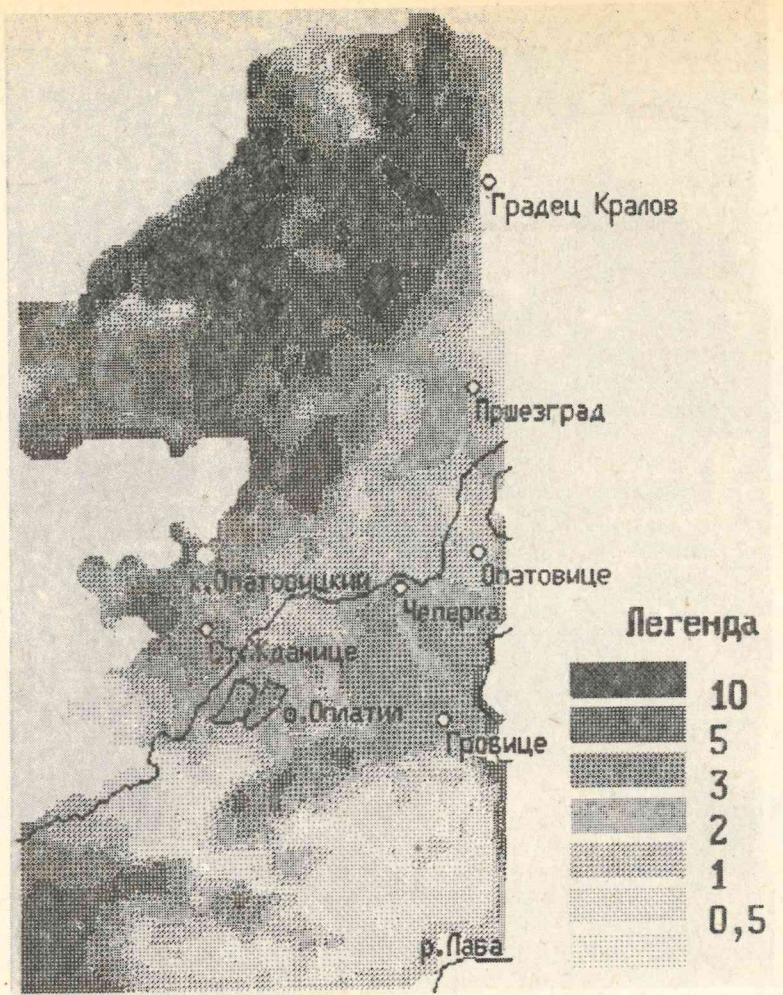


Рис. 3. Модельная карта глубин залегания грунтовых вод (м), масштаб 1 : 150 000

Водовмещающие четвертичные отложения представлены здесь в основном разновозрастными аллювиальными песками с гравием. Мощность водоносного горизонта (обводненных песков) незначительна и изменяется в пределах 1—15 м (рис. 2), составляя в среднем 6—8 м. Отложения отличаются высокой неоднородностью в плане и разрезе — коэффициент фильтрации изменяется в диапазоне от 2 (на высоких террасах) до 130 м/сут (в пределах падиолины р. Лабы), составляя в среднем 20—40 м/сут. Глубина залегания уровней грунтовых вод на большей части территории составляет 0.5—5.0 м (рис. 3).

На изучаемой территории проводятся многолетние наблюдения, позволяющие судить о состоянии атмосферы, почв, поверхностных и подземных вод. Сеть мониторинга подземных вод насчитывает несколько десятков пунктов наблюдения, по которым имеются сведения за период около 40 лет (например, разновременные данные по уровням подземных вод относятся почти к 150 пунктам наблюдений).

Закономерности формирования подземных вод территории

Поток подземных вод четвертичного водоносного горизонта направлен преимущественно с севера на юго-восток и юг (рис. 4), т. е. в направлении понижения рельефа и падения кровли водоупора. При этом поток носит безнапорный характер и формируется за счет инфильтрации атмосферных осадков (преимущественно) и потерь воды из рек и оросительных каналов.

Как показывают результаты многочисленных исследований на территориях России, Украины и Чехии, выполненных ранее, а также результаты калибровки геофильтрационной модели данной территории, условия питания подземных вод существенно зависят от локальных ландшафтно-геоморфологических особенностей. В соответствии с этим здесь были выделены следующие зоны, характеризующиеся различными условиями питания подземных вод: а) лесные массивы; б) неорошаемые сельхозугодья; в) массивы орошения и г) территории жилой застройки и приусадебных хозяйств. Не менее важным фактором, определяющим эффективную интенсивность инфильтрационного питания подземных вод для данной территории, является глубина залегания уровня грунтовых вод.

Для определения зависимости интенсивности инфильтрационного питания подземных вод от глубины залегания уровня первого от поверхности водоносного горизонта было выполнено моделирование влагопереноса в зоне аэрации для типового (для данной местности) гидрогеологического разреза и в условиях открытой местности. Входными данными для этой модели, помимо гидрогеологических и гидрофизических характеристик разреза, являлись климатические показатели (среднемноголетний месячный слой осадков и среднемесячные температуры воздуха за период наблюдений) приведенные выше (табл. 1).

На первом этапе производилась калибровка (верификация) модели, в результате которой уточнялись заданные параметры, условия поступления воды в почву и ее оттока. Достоверность модели определялась по степени совпадения между модельным гидраграфом суммарного стока и фактическим гидраграфом р. Лабы и модельным и наблюденным режимом уровня подземных вод (среднемноголетние уровни по наблюдательной скважине гидрометслужбы V-3K) соответственно. Результаты верификации модели приведены в табл. 2 (первая выделенная строка). На втором этапе полученная модель использовалась для расчета влагопереноса для оценки баланса при других глубинах залегания (табл. 2).

Обычно зависимость интенсивности инфильтрационного питания подземных вод аппроксимируются выражением экспоненциального типа [1], например:

$$W = \frac{W_s Z_k + W_u Z}{Z_k + Z}, \quad (1)$$

где W — расчетное значение интенсивности инфильтрационного питания подземных вод; W_s и W_u — коэффициенты интенсивности эвапотранспирации и инфильтрационного питания подземных вод; Z_k и Z — «критическая» и фактическая глубина залегания уровня грунтовых вод. Из формулы (1) виден физический смысл входящих в нее констант. W_s — интенсивность эвапотранспирации при нулевой глубине залегания уровня, W_u — интенсивности инфильтрационного питания подземных вод при бесконечно большой глубине залегания уровня, Z_k — коэффициент, характеризующий степень роста интенсивности инфильтрационного питания подземных вод с глубиной. Кроме того, при глубине залегания уровня меньше нейтральной глубины Z_0 (где $Z_0 = -W_s Z_k / W_u$), преобладает разгрузка подземных вод путем эвапотранспирации (т. е. восходящий поток влаги в зоне аэрации), а при глубине больше Z_0 — питание подземных вод (т. е. нисходящий поток влаги в зоне аэрации).

Как показывает численный анализ, зависимость (1) вполне удовлетворительно описывает приведенные в табл. 1 данные при следующих значениях параметров:

Таблица 2

Результаты модельной оценки среднемноголетнего водного баланса при различной глубине залегания уровня грунтовых вод

| Средняя глубина залегания уровня грунтовых вод, м | Годовой слой, мм | | | |
|---|------------------|-------------------|--------------------|----------------|
| | осадки | эвапотранспирация | поверхностный сток | подземный сток |
| 1,64 | 602 | 469 | 57 | 79 |
| 7,06 | 602 | 433 | 35 | 134 |
| 2,76 | 602 | 456 | 42 | 111 |
| 2,07 | 602 | 468 | 48 | 91 |
| 1,32 | 602 | 469 | 68 | 65 |
| 1,00 | 602 | 469 | 84 | 48 |
| 0,62 | 602 | 469 | 13 | 20 |
| 0,26 | 602 | 469 | 154 | -20 |
| 0,18 | 602 | 469 | 171 | -37 |
| 0,01 | 602 | 469 | 260 | -126 |

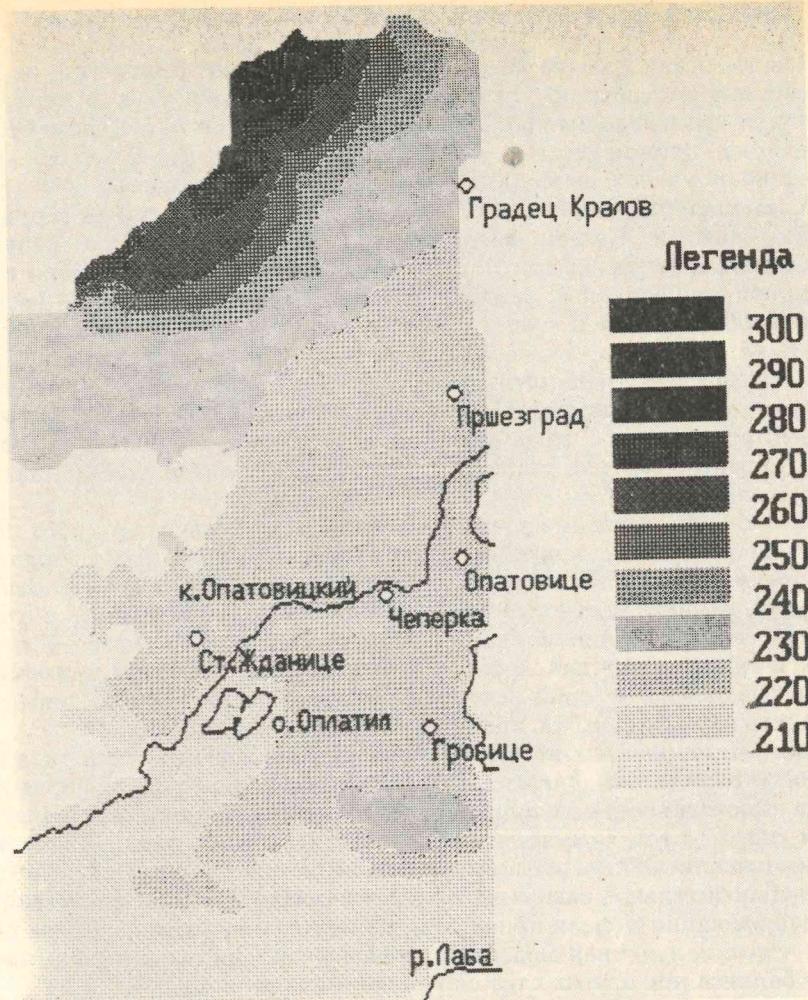


Рис. 4. Модельная карта абсолютных отметок уровней грунтовых вод (м), масштаб 1 : 150 000

$W_s = -469 \text{ мм/год}$, $W_u = 80 \text{ мм/год}$ и $Z_k = 0.1 \text{ м}$. Это означает, в частности, что нейтральная глубина Z_0 составляет здесь в среднем около 0.6 м. В дальнейшем полученные результаты по интенсивности инфильтрационного питания подземных вод использовались при обосновании геофильтрационной модели этой территории. Последующая калибровка геофильтрационной модели показала, что коэффициент W_u для перечисленных выше ландшафтно-геоморфологических зон равен: а) 82.0; б) 69.4; в) 91.4 и г) 88.3 мм/год, а остальные параметры, входящие в зависимость (1), оказались одинаковыми для всех зон.

При калибровке геофильтрационной модели осуществлялся контроль степени совпадения модельных и фактических данных по уровням подземных вод в наблюдательных скважинах и модельных данных притока подземных вод в речную сеть с данными полевых измерений на гидрометрических створах. В результате проведенной калибровки была получена карта интенсивности инфильтрационного питания подземных вод для условий меженного периода 1992 г. (рис. 5). Из этой карты видно, что на большей части территории имеет место инфильтрационное

питание подземных вод, т. е. поток влаги через зону аэрации направлен вниз. Несмотря на значительный современный водоотбор подземных вод, величина которого соизмерима с естественными ресурсами территории, есть области (в основном на юге территории), где и сегодня преобладает разгрузка подземных вод путем эвапотранспирации.

Вместе с тем к основным отрицательным статьям баланса подземных вод территории относятся: разгрузка подземных вод в речную сеть и эксплуатационный водоотбор из скважин и оз. Оплатил (табл. 3).

Кроме того, в балансе подземных вод территории существенную роль (в значительной мере определяющую условия формирования эксплуатационных запасов) играют потери поверхностного стока Опаторицкого канала. Так, отбор подземных вод на водозаборе «Гробице-Чеперка» и поверхностных вод оз. Оплатил лишь на 50% формируется за счет естественных ресурсов подземных вод. Остальная часть эксплуатационных запасов подземных вод формируется за счет привлекаемых ресурсов.

Построенная таким образом геофильтрационная модель может быть использована для прогнозных оценок. В частности, с ее помощью были выполнены эпигнозные оценки (восстановление естественного режима и баланса подземных вод территории) для периодов разной водности и прогноз возможности увеличения водоотбора для удовлетворения существующей потребности в воде питьевого качества. Необходимо при этом отметить, что, поскольку положение уровней подземных вод существенно зависит от естественных (изменчивость климатических показателей, в частности водности) и техногенных (отбор подземных вод) факторов, условия питания и разгрузки подземных вод существенно непостоянны. Так, если в естественных условиях в южной части территории имелась обширная область разгрузки подземных вод за счет интенсивной эвапотранспирации при неглубоком залегании уровней (здесь на старых топографических картах изображались болота), то в сегодняшних условиях эта область сильно сократилась (светлые тона на рис. 5). При проектируемой интенсификации водоотбора эвапотранспирация практически полностью инвертируется на инфильтрацию.

Таблица 3

Модельный баланс подземных вод на меженный период 1992 года (л/с.)

| Статья | Питание | Реки | Озеро | Скважины |
|--------|---------|--------|----------|----------|
| Приток | 299,80 | 85,92 | 0 | 0 |
| Отток | 11,37 | 200,63 | 81,73 | 91,73 |
| | | | Небаланс | 0,26 |

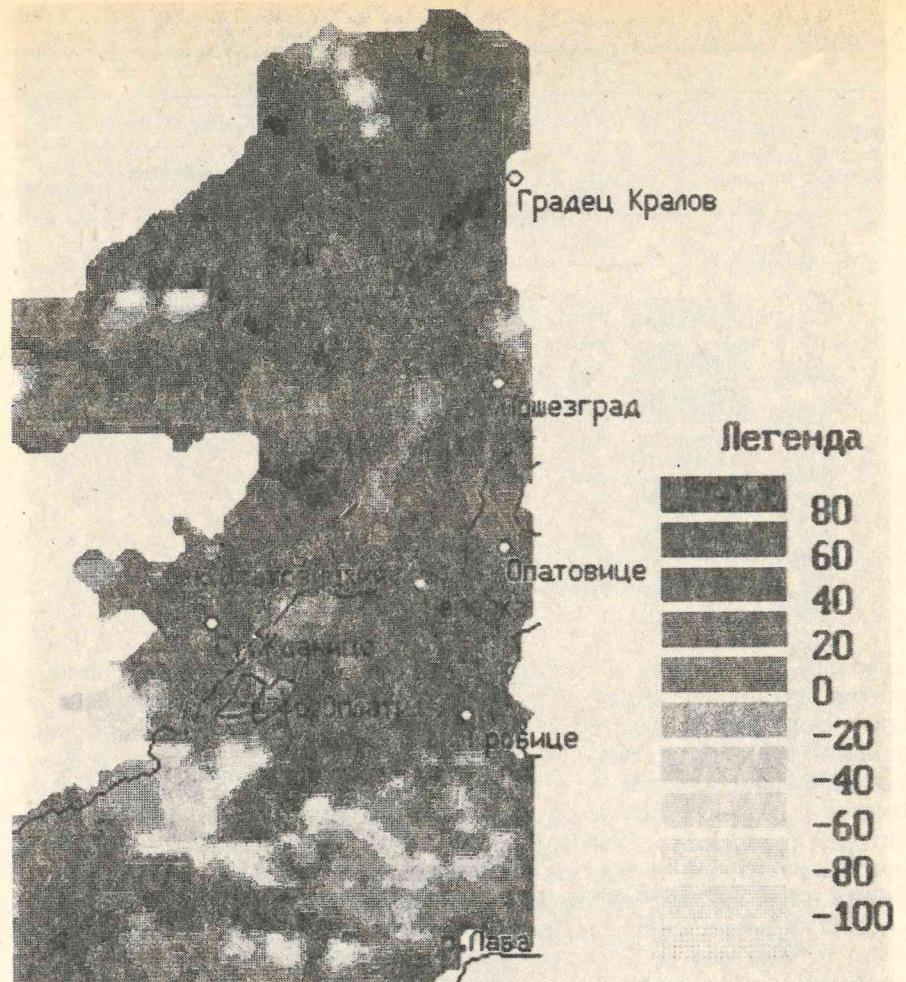


Рис. 5. Модельная карта интенсивности инфильтрационного питания подземных вод (мм/год), масштаб 1 : 150 000

Оценка защищенности грунтовых вод территории от загрязнения

В настоящее время в мире используется несколько методических подходов к оценке защищенности подземных вод от загрязнения. Так, в США принята методика, разработанная в National Ground Water Association (A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential). Эта методика предназначена для балльной оценки прежде всего больших территорий, сильно различающихся по своим геологическим условиям, и, как показывает анализ, она не применима для небольших территорий с однотипным строением. В частности, для рассматриваемой территории максимальный балл (156) и минимальный (127), подсчитанные по этой методике, практически не различаются.

В Чехии, России и других странах СНГ принята методика балльной оценки, разработанная во ВСЕГИНГЕО [2]. Эта методика предполагает балльную оценку защищенности подземных вод от загрязнения. Она проводится раздельно для

глубоких (напорных) и для грунтовых водоносных горизонтов. Однако методика, предлагаемая в [2] для грунтовых водоносных горизонтов, не учитывает такого важнейшего фактора, как защитная роль почвенного слоя, который в рассматриваемых условиях является единственной преградой для загрязнителя.

Оценку защищенности грунтовых вод от загрязнения удобнее всего производить по времени, необходимому для миграции консервативного компонента от поверхности земли до уровня грунтовых вод. Это время (в годах) для слоистой толщи, состоящей из l слоев, может быть вычислено по формуле

$$t = \left(40/W\right) \cdot \sum_{i=1}^{i=l} m_i \cdot (k_i)^{-1/n}, \quad (2)$$

где m_i — мощность i -го слоя (м); k_i — его коэффициент фильтрации ($\text{м}/\text{сут}$); W — интенсивность инфильтрационного питания ($\text{мм}/\text{год}$); n — безразмерный показатель степени, зависящий от принятой модели влагопереноса (обычно для суглинков и глин этот параметр равен 4,0, а для песков — 3,6).

Легко видеть, что для рассматриваемых условий это время полностью определяется мощностью и проницаемостью почвенного покрова.

Для построения карты защищенности в соответствии с формулой (2) необходимы следующие карты: а) проницаемости почвенного покрова; б) мощности почвенного покрова; в) интенсивности инфильтрационного питания подземных вод.

Поскольку отсутствуют прямые массовые определения фильтрационных свойств почв этой территории, то для построения карты проницаемости почвенного покрова использовались литературные данные (табл. 4) и сведения по зернистости почв, приведенные на изданной почвенной карте (Kartogram zrnisti, sterkoitost a zamokreni, 1 : 50 000, 1964 г.).

Карта мощности почвенного покрова составлялась по данным многочисленных скважин на основе кrigинг-анализа (теория метода изложена, например, в [3]), а в качестве карты интенсивности инфильтрационного питания подземных вод использовались данные, полученные при калибровке геофильтрационной модели для меженного периода 1992 года (рис. 5).

Таблица 4

Фильтрационные свойства различных почв

| N п/п | Тип почвы | k , $\text{м}/\text{сут}$ | $k^{-1/n}$ |
|-------|-------------------|-----------------------------|------------|
| 1 | Песчаные | 4,0 | 0,7 |
| 2 | Глинисто-песчаные | 0,3 | 1,4 |
| 3 | Песчано-глинистые | 0,5 | 1,2 |
| 4 | Глинистые | 0,001 | 5,62 |
| 5 | Иловато-глинистые | 0,01 | 3,16 |
| 6 | Иловатые | 0,05 | 2,1 |
| 7 | Илистые | 0,005 | 3,7 |

С помощью ЭВМ осуществлен синтез этих карт и построена карта защищенности грунтовых вод от загрязнения, характеризующая время (в годах), необходимое для миграции консервативного компонента от поверхности земли до грунтовых вод (рис. 6). Эта карта отражает состояние защищенности грунтовых вод для условий меженного периода 1992 г. Однако, как показано выше, интенсивность инфильтрационного питания подземных вод не является постоянной величиной и существенно изменяется под влиянием естественных и техногенных факторов. Поэтому и защищенность грунтовых вод существенно зависит от этих факторов. Для демонстрации этой зависимости на рис. 7 приводится аналогичная карта защищенности грунтовых вод, но построенная для естественных (ненарушенных) условий маловодного меженного периода 95% обеспеченности.

Как видно из гистограмм, сопровождающих эти карты, на большей части территории (как в естественных, так и в нарушенных условиях) грунтовые воды слабо защищены от загрязнения. В частности, на более чем 70% территории время поступления загрязнения от поверхности земли до уровня грунтовых вод составляет менее полугода. Это объясняется тем, что на данной территории преобладают песчаные почвы и мощность почвенного покрова здесь незначительна.

Лишь небольшая часть территории (18% в естественных условиях или 13% в межень 1992 г.) может быть отнесена к относительно или полностью защищенной от загрязнения грунтовых вод (время поступления загрязнения составляет более одного года). В эту же часть территории попадают и области, на которых преобладает эвапотранспирации, т. е. имеет место восходящий поток влаги в зоне аэрации. Относительная площадь таких областей составляла в естественных условиях около 15%. Однако под влиянием интенсивного водоотбора на водозаборах «Гробнице-Чеперка» и «Оплатил» площадь области практически защищенной от загрязнения заметно сократилась (примерно до 11%). При этом, что особенно важно, территории непосредственно примыкающие к этим водозаборам и бывшие в естественных условиях практически защищенными перешли в разряд весьма слабозащищенных (время поступления загрязнения меньше 0,1 года — темные тона в центре рис. 6).

Прогнозное моделирование показывает, что дальнейшая интенсификация водоотбора, связанная с ростом потребности в воде, будет приводить к расширению областей слабозащищенных от загрязнения за счет сокращения площадей практически защищенных от загрязнения.

Формирование химического состава грунтовых вод под влиянием техногенных факторов

Формирование химического состава грунтовых вод происходит под влиянием различных источников химических элементов. Одни из них приводят к региональным изменениям в химическом составе грунтовых вод, другие проявляются локально, в непосредственной близости от источника. В данной работе остановимся лишь на исследовании закономерностей регионального загрязнения грунтовых вод.

Как показывают многолетние наблюдения, региональные изменения в составе грунтовых вод на рассматриваемой территории происходят вследствие выбросов веществ в атмосферу промышленными и энергетическими комплексами и химической мелиорацией почв, осуществляющей сельскохозяйственной деятельностью. Анализ данных гидрохимического мониторинга грунтовых вод показывает, что в период с 1950-х годов по 1992 г. в химическом составе грунтовых вод произошли существенные изменения. Так, среднее содержание сульфат-иона выросло с 80 до 200—300 mg/dm^3 , а нитратов с 2—5 до 50—150 mg/dm^3 .

Для выявления закономерностей изменения качества грунтовых вод (содержания нитратов и сульфатов) был проведен тренд-анализ. Для этого в качестве



Рис. 6. Схематическая карта защищенности грунтовых вод для меженного периода 1992 г., масштаб 1 : 150 000



Рис. 7. Схематическая карта защищенности грунтовых вод для естественных условий для меженного периода 9 % обеспеченности, масштаб 1 : 150 000

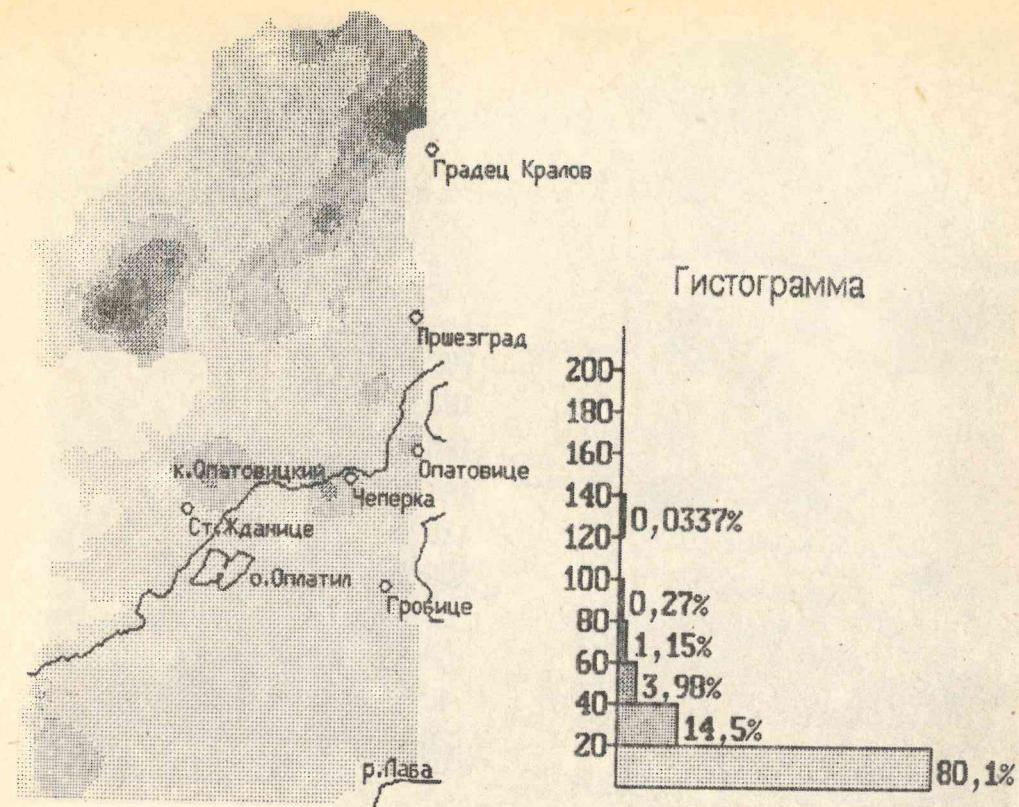


Рис. 8. Схематическая карта содержания нитратов в грунтовых водах (mg/dm^3) в период с 1963 до 1976 г., масштаб 1 : 150 000

временных рядов использовались результаты разновременного гидрогохимического опробования всех скважин территории. Этот анализ показывает, что до 70-х годов качество подземных вод оставалось в основном стабильным. Обработка данных 80—90-х годов дает устойчивый тренд, свидетельствующий о постоянном росте загрязнения грунтовых вод территории.

На рис. 8—11 представлены карты среднего содержания нитратов и сульфатов в грунтовых водах за периоды с 1963 по 1976 и с 1982 по 1992 г. соответственно, построенные по данным разновременного опробования с использованием крипинг-анализа. Из этих данных следует, что до конца 70-х годов грунтовые воды имели здесь гидрокарбонатный состав (что вполне естественно для данных климатических условий), а содержание сульфат-иона на большей части территории (около 70% площади) не превышало $100 \text{ mg}/\text{dm}^3$. Затем тип грунтовых вод заменился на сульфатный. При этом примерно на 40% территории содержание сульфат-иона превышает сегодня допустимое ГОСТами России и Чехии значение ($250 \text{ mg}/\text{dm}^3$).

Сопоставление данных по содержанию нитратов в грунтовых водах (рис. 8, 9), показывает, что, если до середины 70-х годов на большей части территории (более 80% площади) их концентрация не превышала $20 \text{ mg}/\text{dm}^3$, то за последнее десятилетие она резко возросла. Среднее содержание нитратов сегодня составляет $40—50 \text{ mg}/\text{dm}^3$, но на отдельных участках оно достигает $200 \text{ mg}/\text{dm}^3$ и более.

Анализ современных данных по содержанию сульфатов в грунтовых водах

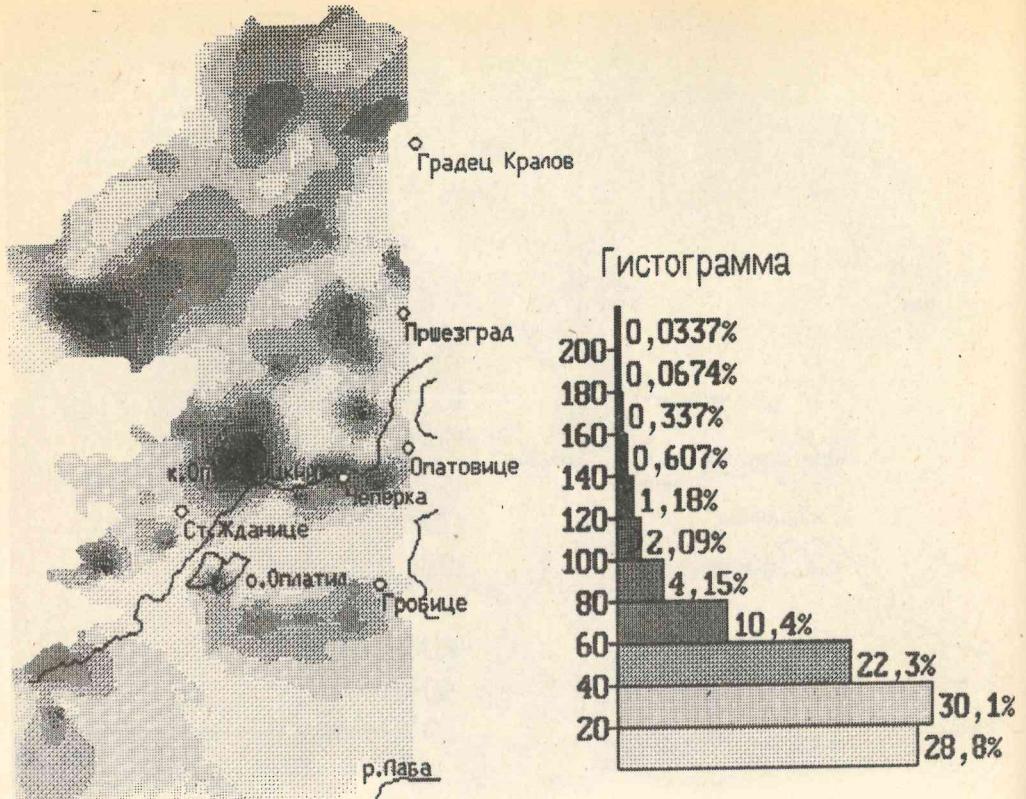


Рис. 9. Схематическая карта содержания нитратов в грунтовых водах ($\text{мг}/\text{дм}^3$) в период с 1982 до 1992 г., масштаб 1 : 150 000

(рис. 11) показывает, что площадное их распространение имеет определенные закономерности. В частности, наибольшие изменения и соответственно концентрации приурочены к повышенным отметкам рельефа.

Наблюдаемые закономерности повышения содержания сульфатов в грунтовых водах со всей очевидностью связаны с выбросами диоксида серы Опатовицкой электростанцией, составляющими $56700 \text{ т}/\text{год}$. Для оценки степени влияния этих выбросов было выполнено моделирование среднегодовой приземной концентрации диоксида серы в воздухе. Для этих целей использовалась гауссовская модель, широко применяемая для подобных расчетов [4, 5]. В соответствии с этой моделью среднегодовая концентрация того или иного вещества $C_a \text{ г}/\text{м}^3$ в приземном слое атмосферы (на высоте 1.5 м от поверхности земли) под влиянием выбросов точечного источника, определяется по формуле

$$C_a = \frac{Q}{\pi \sigma_z \sqrt{2} u h} \left[\exp \left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{(2A + h^2)}{2\sigma_z^2} \right) + \right. \\ \left. + \exp \left(-\frac{(2A + h^2)}{2\sigma_z^2} \right) \right], \quad (3)$$

где Q — интенсивность выбросов ($\text{г}/\text{с.}$); u — скорость ветра на высоте источника ($\text{м}/\text{с.}$); σ_z — стандартное отклонение концентрации по вертикали

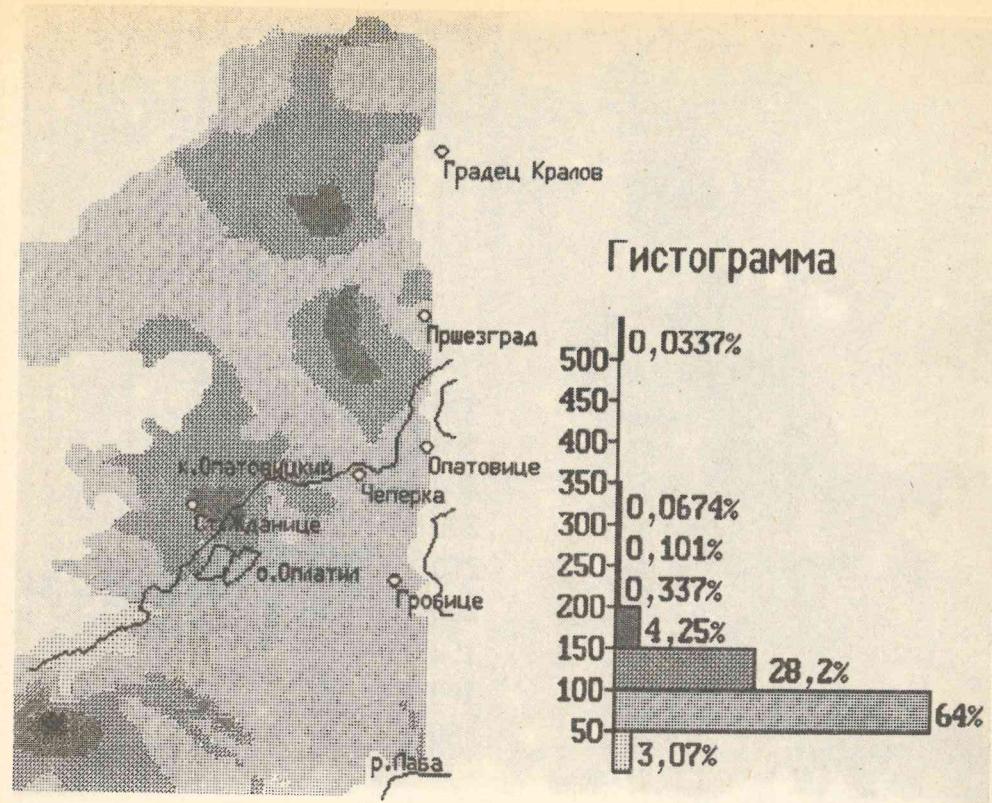


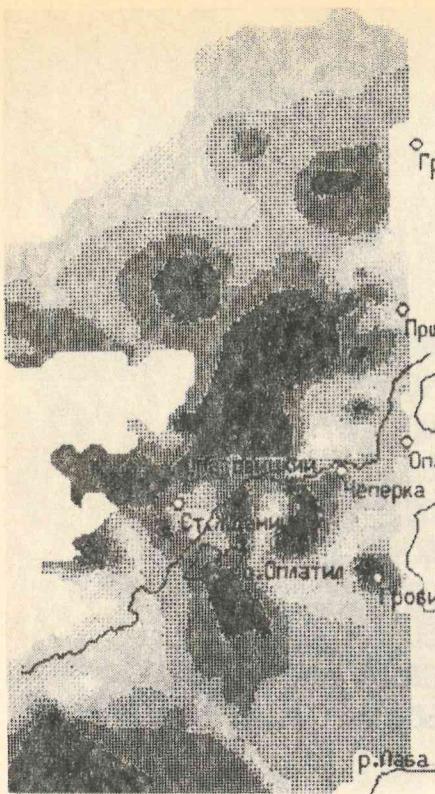
Рис. 10. Схематическая карта содержания сульфат-иона в грунтовых водах ($\text{мг}/\text{дм}^3$) в период с 1963 до 1976 г., масштаб 1 : 150 000

$(\sigma_z \approx 0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2})$; x — расстояние от источника до расчетной точки; A — высота инверсионного слоя над поверхностью земли (м) (для средней стабильности атмосферы $A = 800 \text{ м}$); h — высота центральной оси суттана выброса над поверхностью земли (м).

При моделировании принимались условия средней стабильности атмосферы при высоте трубы 125 м и скорости ветра 5 м/с. Распределение концентрации в приземном слое воздуха по результатам моделирования представлено на рис. 12. Полученные результаты хорошо корреспондируют с фактическими данными высотной обсерватории г. Градец Кралов по содержанию окислов серы в атмосфере.

Сопоставление модельной карты содержания диоксида серы в приземном слое атмосферы (рис. 12) и карты содержания сульфатов в грунтовых водах (рис. 11) показывает их очевидную взаимосвязь. Это подтверждается наличием корреляции между этими величинами. Особенно хорошая корреляция имеется для областей с высокими содержаниями диоксидов серы и сульфат-иона. Здесь коэффициент корреляции достигает 0.7.

Процесс загрязнения грунтовых вод сульфатами рассматривался также путем численного моделирования миграции и влагопереноса в зоне аэрации. Начальное содержание сульфатов в грунтовых водах принималось при этом в соответствии с данными 1950—1960 гг. равным $50 \text{ мг}/\text{дм}^3$. При этом следует отметить, что эта величина хорошо подтверждается элементарным расчетом баланса солей по формуле



Гистограмма

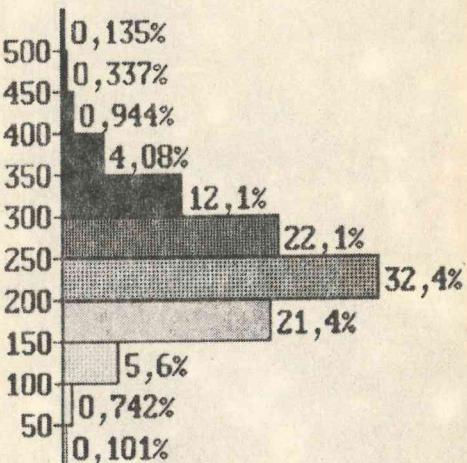


Рис. 11. Схематическая карта содержания сульфат-иона в грунтовых водах (mg/dm^3) в период с 1982 до 1992 г., масштаб 1 : 150 000

$$C = \frac{O \cdot C_0}{W} \quad (4)$$

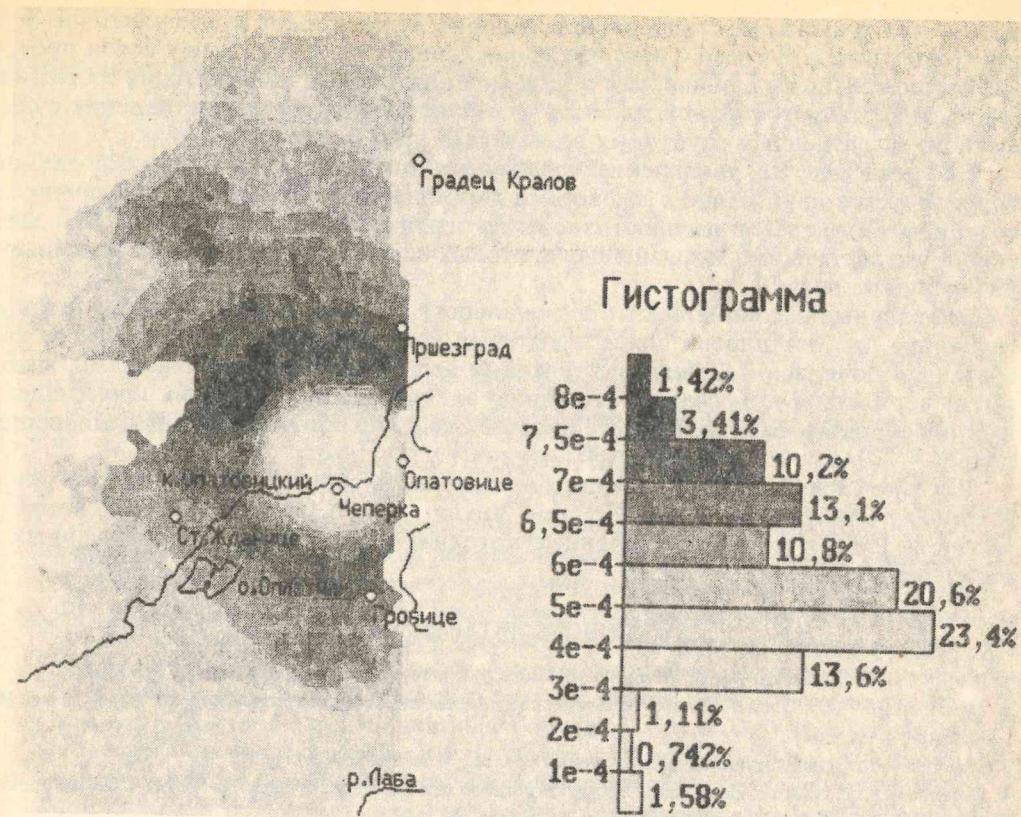
где O — осадки ($\text{мм}/\text{год}$); C_0 — содержание компонента в атмосферных водах ($\text{мг}/\text{дм}^3$); W — интенсивность инфильтрационного питания подземных вод ($\text{мм}/\text{год}$). При $C_0 = 5 \text{ мг}/\text{дм}^3$ (что характерно для Европейского фона), $O = 600 \text{ мм}/\text{год}$ и $W = 60 \text{ мм}/\text{год}$ получим $C = 50 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

При моделировании современное содержание сульфат-иона в атмосферных осадках принималось равным $20 \text{ мг}/\text{дм}^3$, что характерно для урбанизированных территорий. Результаты расчетов миграции и влагопереноса на срок 20 лет представлены на рис. 13. Пересчет содержания сульфат-иона в породе ($\text{мг}/\text{кг}$) на поровый раствор при пористости 0,3 и объемном весе 1.3 дает концентрацию $250 \text{ мг}/\text{дм}^3$, что соответствует и расчету по формуле (4). Таким образом, становится очевидным, что увеличение содержания сульфат-иона в грунтовых водах прямым образом связано с выбросами Опатовицкой электростанции.

При этом можно утверждать, что на большей части территории достигнуто равновесное состояние между приходом и накоплением этого компонента в зоне аэрации. Время достижения равновесного состояния можно оценить по формуле

$$t = \frac{3V}{W}, \quad (5)$$

где V — объем влаги в зоне аэрации, приходящийся на единицу площади горизонтального сечения (мм).



Гистограмма

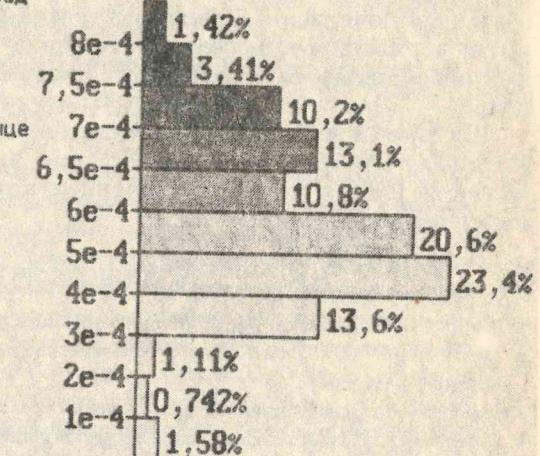


Рис. 12

Рис. 12. Модельная карта содержания диоксида серы в приземном слое атмосферы ($\text{мг}/\text{дм}^3$), масштаб 1 : 150 000

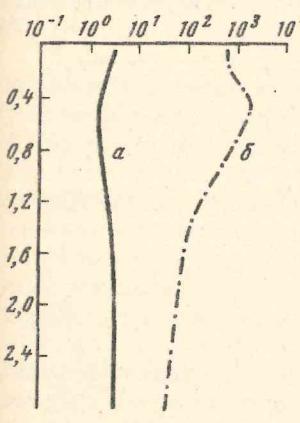


Рис. 13

Рис. 13. Модельные эпюры содержания сульфатов в зоне аэрации ($\text{мг}/\text{кг}$). *а* — естественные условия; *б* — состояние в 80—90-х годах

При средней мощности зоны аэрации (глубине залегания уровня), равной 2.0 м, и средней влажности пород, равной 15 %, $V = 300 \text{ мм}$. Следовательно, среднее время достижения равновесного состояния в соответствии с формулой (5) составит $t = 15$ лет. Поскольку данные, положенные в основу карт, представленных на рис. 10 и 11, разделены промежутком времени в 15—25 лет, то стабильный режим солевого переноса в зоне аэрации можно считать достигнутым. Вместе с тем нельзя утверждать, что на большей части территории достигнуто равновесное состояние между приходом и накоплением этого компонента в зоне аэрации.

ждать, что достигнуто стационарное распределение содержания сульфатов и в грунтовых водах. В связи с тем, что процесс миграции в грунтовых водах протекает значительно медленнее, чем в зоне аэрации, наблюдаемое сегодня состояние (рис. 11) не является окончательным — и накопление, и распространение сульфатного загрязнения в грунтовых водах будут продолжаться.

Наблюдаемое же увеличение содержания нитратов в грунтовых водах не коррелируется однозначно с выбросами диоксида азота. Участки с повышенным содержанием нитратов распространены по территории не закономерно. Это дает основание считать, что загрязнение грунтовых вод нитратами связано с внесением удобрений на поля.

Выявленные закономерности регионального загрязнения грунтовых вод дают основание для постановки более детальных исследований с целью прогноза загрязнения почв, зоны аэрации и грунтовых вод всеми теми компонентами, которые содержатся в выбросах Опавовицкой электростанции и других промышленных предприятий района, а также вносятся на поля при химической мелиорации почв.

В заключение авторы выражают благодарность своим коллегам Л. Кршижу и Л. Влчеку (АО Водные Зdroi-Хрудим, Чехия) и А. Д. Френкелю (СП Геософт-Истлинк, Россия) за предоставленные материалы, участие в обработке данных и моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кац Д. М., Пашковский И. С. Мелиоративная гидрогеология. М.: Агропромиздат, 1988. 256 с.
2. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
3. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 408 с.
4. Gofford F. A. Further comparesons of urban air polution models. Pept. to 5th Mtg. NATO/CCMS Panel on Air Pollution Modeling, Roskilde, June 4—6, 1974. 6 p.
5. Tlapak V., Salek J., Legat V. Voda v zemedelske krajine. Praha: Vydalo Zemedelske nakladatelstvi Brazda ve spolupraci s ministerstvem zivotniho prostredi CR, 1992. 320 str.

Российско-Шведское совместное предприятие Геософт-Истлинк
(Москва, Российская Федерация)
НИИ Растениеводства, отдел мониторинга инородных веществ
(Прага, Чешская республика)
Высший сельскохозяйственный институт, кафедра экологии
(Прага, Чешская республика).

Поступила в редакцию
18.V.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

2 · 1995

УДК 556.3

© 1995 г. А. Н. ВОРОНОВ, А. А. ШВАРЦ

НОВЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД¹

Для полной оценки качества воды необходимо от однозначных оценок для питьевых вод типа «пригодна — непригодна» переходить к определению ее природных свойств, влияющих на здоровье человека, экологической чистоты и стабильности этих показателей. При изучении качества подземных вод, помимо определения компонентов, содержание которых превышает ПДК, необходимо учитывать отсутствие или недостаточное количество целого ряда биологически активных компонентов, присутствие которых в водах внешней среды и во внутренних средах организмов играет важную роль в регуляции процессов жизнедеятельности человека. Из-за большого числа различных соединений естественного и техногенного происхождения при оценке качества воды, помимо обычного химического анализа наиболее распространенных компонентов, необходимо проводить суммарную токсикологическую оценку воды, основанную на сочетании различных методов биотестирования. В связи со сложностью поставленной проблемы для разработки понятия «оптимального химического состава питьевой воды» представляется необходимой совместная работа специалистов в различных областях науки (биологов, медиков, токсикологов, физиологов, гидрогеологов и т. д.).

В связи с глобальным загрязнением поверхностных вод централизованное водоснабжение все в большей степени ориентируется на подземные воды. Так, в России более 60% городов использует для водоснабжения подземные резервуары. В других странах доля подземного водоснабжения еще выше. Однако в условиях растущей техногенной нагрузки на окружающую среду и подземные воды подвергаются загрязнению. Техногенные компоненты обнаруживаются уже не только в верхних, слабо защищенных водоносных горизонтах, но и в глубоких артезианских резервуарах. Загрязнение подземных вод влечет за собой целый ряд экологических и социальных последствий. Требует серьезного внимания распространение загрязняющих компонентов из подземных вод по пищевым цепям. В этом случае токсические элементы попадают в организм человека не только с питьевой водой, но и через растительную и животную пищу. Даже если население не пьет загрязненную воду, а только использует ее для приготовления пищи, водопоя скота и полива растений, это может отразиться на здоровье не только нынешнего, но и последующих поколений. Своевременный, оперативный и качественный контроль за химическим составом воды, используемой для хозяйствственно-бытовых целей, является одним из условий улучшения состояния здоровья населения.

Проблема качества подземных вод в настоящее время превратилась в одну из самых актуальных проблем человечества. Об этом свидетельствует растущее

¹ Работа выполнена при поддержке «Фонда фундаментальных исследований». Код проекта 93-05-12 238 «Оценка экологического качества вод...».

число публикаций на эту тему, значительное число семинаров и совещаний специалистов, активное обсуждение общественностью экологического состояния воды. В то же время в этой проблеме многие вопросы остаются до конца не решенными, нуждающимися в научном обосновании. Обилие и разнообразие норм, зачастую недостаточно обоснованных или некорректно сформулированных, а иногда и противоречащих друг другу, ставит перед практиками и исследователями трудную задачу.

Действующий в настоящее время стандарт (ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая») ограничивает по микробиологическим показателям содержание в воде микроорганизмов и число кишечных палочек, по токсикологическим показателям устанавливает предельно допустимые концентрации (ПДК) для 10 компонентов и по органолептическим показателям — еще для 10, однако ссылка на то, что концентрации химических веществ, не указанных в ГОСТе, не должны превышать ПДК, утвержденных Министерством здравоохранения, а также норм радиационной безопасности, делает весьма затруднительным его практическое применение. Нормативными документами Минздрава установлены ПДК для нескольких сотен элементов и соединений, их число постоянно растет, и с экономической точки зрения анализ воды службами Госсанэпидемнадзора становится проблематичным.

Все это делает необходимым выработку новых подходов к оценке экологического качества питьевых вод, решение ряда теоретических и прикладных вопросов.

Химический состав подземных вод представляет собой результат сложных взаимодействий в системе вода — порода — газ — живое вещество, и в регионах с различными гидрогеологическими условиями пресные воды могут иметь совершенно различный химический макро- и микрокомпонентный состав. В природных условиях мы имеем чрезвычайно широкий спектр естественного состава подземных вод. В настоящее время в пресных подземных водах современными аналитическими методами обнаруживают более 80 химических элементов, которые могут составлять несколько тысяч неорганических и органических соединений.

Из-за большого числа различных соединений естественного и техногенного происхождения при оценке качества воды, помимо обычного химического анализа наиболее распространенных загрязнителей, необходимо проводить суммарную токсикологическую оценку воды, основанную на сочетании различных методов биотестирования. В настоящее время существует большое число методов, основанных на реакции различных ферментов, клеточных культур, микроорганизмов и простейших организмов на качество воды. Актуальной задачей представляется выделение двух-трех наиболее простых и эффективных методов для определения в воде токсикантов и введение этих методов в ГОСТ.

Однако для полной оценки качества воды необходимо от однозначных оценок для питьевых вод типа «пригодна — непригодна» переходить к определению ее природных свойств, влияющих на здоровье человека, экологической чистоты и стабильности этих показателей. При изучении качества подземных вод помимо определения компонентов, содержание которых превышает ПДК, необходимо учитывать отсутствие или недостаточное количество целого ряда биологически активных компонентов. Ковальский В. В. [3] выделил целый ряд катионов и анионов, присутствие которых в водах внешней среды и во внутренних средах организма играет важную роль в регуляции процессов жизнедеятельности человека. Среди них в первую очередь можно отметить калий, натрий, кальций, магний, литий, рубидий, железо, медь, цинк, галий, кобальт, никель, марганец, молибден, кадмий, хром, титан, ванадий, стронций, барий, хлор, иод, фтор, селен, мышьяк. Полное отсутствие этих элементов так же опасно, как и их повышенные концентрации. Относительно минимально допустимого содержания микроэлементов в воде вопрос усложняется в связи с их возможным поступлением с продуктами питания, однако в регионах, где тот или иной элемент отсутствует в природных водах, его содержание в местных продуктах питания также очень

низко. Медики выделяют целую группу заболеваний, связанных с пониженным содержанием различных микроэлементов в среде обитания организмов, в первую очередь в воде и геологической среде в целом — это, так называемые, экзогенные первичные микроэлементы [1]. Среди наиболее распространенных заболеваний, связанных с низким содержанием микроэлементов в питьевой воде, можно назвать эндемический зоб (низкое содержание иода), кариес зубов (низкое содержание фтора), железодефицитные анемии (низкое содержание железа и меди). В качестве примера можно привести результаты работы советско-финской экспедиции, которая обнаружила, что из-за низкого содержания в воде и почве селена населению ряда районов Читинской обл. угрожает селенодефицитная кардиопатия — болезнь Кешана [2].

Среди макрокомпонентного состава воды особенно негативное влияние на организм человека оказывает низкое содержание в питьевой воде кальция и магния. Так, например, результаты санитарно-эпидемиологических обследований населения, проводимых по программам ВОЗ, показывают, что низкое содержание в питьевой воде кальция и магния приводит к увеличению числа сердечно-сосудистых заболеваний [5]. В результате исследований в Англии было выбрано 6 городов с самой жесткой и столь же с самой мягкой питьевой водой. Смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в городах с жесткой водой оказалась ниже нормы, в то время как в городах с мягкой водой — выше. Более того, у населения живущего в городах с жесткой водой, параметры деятельности сердечно-сосудистой системы лучше: ниже общее кровяное давление, ниже частота сокращений сердца в покое, а также содержание холестерина в крови. Курение, социально-экономические и другие факторы не влияли на эти корреляции. В Финляндии более высокая смертность от сердечно-сосудистых заболеваний, повышенное кровяное давление и содержание холестерина в крови в восточной ее части по сравнению с западной, по всей видимости, также связаны с использованием мягкой воды, так как другие параметры (диета, физическая нагрузка населения этих групп и т. д.) практически не различаются.

В последнее время эти данные получили клиническое подтверждение. Группой исследователей под руководством Чуриной С. К. [4, 7] установлено, что 60—80% суточной потребности кальция и магния у человека удовлетворяется за счет пищи. Но значение кальция и магния в суточном рационе можно оценить, если учесть требования ВОЗ к содержанию этих катионов в воде. Для кальция они составляют 80—100 мг/л, или ~120—150 мг/сут, а для магния — до 150 мг/л, или около ~200 мг/сут при общей суточной потребности, например, кальция 500 мг. Показано, что кальций и магний из воды всасываются в кишечнике полностью, а из продуктов, в которых он связан с белком, только на $\frac{1}{3}$.

Уровень кальция в клетке является универсальным фактором регуляции всех клеточных функций независимо от типа клеток. Недостаток кальция в воде сказывается на увеличении всасывания и токсического действия тяжелых металлов (кадмий, ртуть, свинец, алюминий и др.). Тяжелые металлы конкурируют с кальцием в клетке, так как используют его метаболические пути для проникновения в организм и замещают ионы кальция в важнейших регуляторных белках, нарушая таким образом их нормальную работу.

К настоящему времени можно с уверенностью утверждать, что мягкая питьевая вода, характерная для северных регионов планеты, с низким содержанием жизненно важных для организма двухвалентных катионов (Ca и Mg) является существенным экологическим фактором риска сердечно-сосудистой патологии и других широко распространенных Ca- Mg- зависимых региональных заболеваний.

Таким образом, при разработке требований к качеству воды, используемой для питьевых целей, необходимо нормировать и нижний предел содержания целого ряда компонентов.

В последнее время кафедрой гидрогеологии Санкт-Петербургского университета предпринята попытка оценки качества подземных вод пригородов Санкт-Петербурга. Отличительной особенностью данного региона является раз-

нообразие гидрогеологических условий, связанное с положением в краевой части Русской платформы и как следствие большое разнообразие в химическом составе подземных вод различных водоносных горизонтов. Разными являются также защищенность и степень антропогенной нагрузки. Основными коллекторами подземных вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, являются вендинские песчаники нижнекотлинского водоносного горизонта и песчаные образования межморенного комплекса четвертичных отложений на Карельском перешейке, а также закарстованные известняки ордовика на Ижорской возвышенности. Практически по всей территории своего распространения нижнекотлинский (гдовский) водоносный горизонт является напорным (напор 50—80 м и более). Он активно используется для водоснабжения. Дебит скважин колеблется от 80 до 900 м³/сут при понижении 5—10 м. По химическому составу воды гидрокарбонатно-кальциевые. Минерализация повышается в южном направлении от 100 мг/л в северной части до 1000 мг/л примерно по линии Сестрорецк — Песочная. Далее на юг воды становятся хлоридно-натриевыми, а минерализация увеличивается до 3—35 г/л. В Петербурге воды этого горизонта используются для технических целей, а в ряде санаториев как лечебные воды (Сестрорецк, Петергоф, Луга). В южной части Карельского перешейка из-за повышенной минерализации нижнекотлинского горизонта для централизованного водоснабжения используются воды четвертичных межморенных отложений. Межморенные водоносные горизонты — напорные, как правило, не выдержаны по мощности и простирации, изменчивы также их фильтрационные параметры. Из наиболее крупных водозаборов, эксплуатирующих воды межморенных отложений, можно отметить водозабор г. Зеленогорска, его суммарный дебит составляет ~8000 м³/сут. По химическому составу воды гидрокарбонатно-натриевые и кальциевые с минерализацией 100—300 мг/л. В отдельных местах (пос. Лисий Нос, г. Сестрорецк, дер. Ручьи и др.) воды имеют повышенную минерализацию — 1100—2800 мг/л, что, по-видимому, связано с подтоком вод из нижнекотлинского горизонта.

При рассмотрении факторов, влияющих на качество подземных вод Карельского перешейка, используемых для питьевого водоснабжения, необходимо выделять гидрогеологическую и антропогенную составляющие. Так, гидрогеологическими условиями нижнекотлинского горизонта объясняется повышенное (до 3 мг/л) содержание фтора в юго-восточной его части или повышенное содержание радона в отдельных скважинах Сестрорецкого курорта, позволяющее считать воды лечебно-минеральными. Минералогический состав вмещающих отложений лежит в основе повсеместно повышенного содержания железа в водах межморенных отложений (до 10 мг/л).

Влияние антропогенного фактора определяется как количеством и химическим составом загрязнений, так и защищенностью водоносных горизонтов. Благодаря хорошей защищенности на большей части своего распространения подземные воды Карельского перешейка в настоящее время не являются загрязненными.

Ордовикский водоносный горизонт на большей части территории плато является верхним. Питание происходит за счет инфильтрации и инфлюкции атмосферных осадков, чему способствует интенсивное развитие карстовых воронок. Движение подземных вод направлено от центральной возвышенной части к периферии. Разгрузка вод осуществляется в зонах эрозионных врезов, часто в виде концентрированных источников большой мощности (до 0,2—0,5 м³/с). Воды ордовикского горизонта пресные, с минерализацией до 1 г/л, гидрокарбонатно-кальциевые-магниевые, обладают слегка повышенной жесткостью (до 7—8 мг-экв/л). Из-за высокой антропогенной нагрузки (в основном сельскохозяйственной) и плохой защищенности подземные воды во многих местах значительно загрязнены нитратами, фенолами, СПАВами, обнаружены в незначительных концентрациях хлор, органические соединения.

Определенный интерес представляет сравнительная оценка качества подзем-

Среднее содержание ряда биологически активных компонентов в различных водоносных горизонтах

| Компоненты | Содержание, мг/л | | |
|------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| | Нижнекотлинский горизонт | Межморенный горизонт | Ордовикский горизонт |
| Ca | 12—20 | 8—20 | 40—60 |
| Mg | 5—12 | 5—12 | 35—45 |
| F | 0,6—1,6 | 0,6—1,2 | 0,9—1,5 |
| Fe | 0,1—0,2 | 0,1—0,5 | 0,01—0,1 |
| Cu | 0,005—0,30 | 0,001—0,007 | 0,002—0,004 |
| Zn | 0,008—0,043 | 0,008—0,009 | 0,001—0,022 |
| Mn | 0,030—0,080 | 0,014—0,062 | 0,010—0,046 |

ных вод перечисленных горизонтов в условиях отсутствия загрязнения. Из таблицы видно, что воды нижнекотлинского и межморенного водоносных горизонтов содержат недостаточно кальция и магния, в то же время здесь выше, чем в водах ордовикского горизонта, концентрации таких компонентов, как железо, медь, цинк и марганец, которые также играют важную роль в деятельности сердечно-сосудистой системы человека.

В связи со сложностью поставленной проблемы для разработки понятия «оптимального химического состава питьевой воды» представляется необходимой совместная работа специалистов в различных областях науки (биологов, медиков, токсикологов, физиологов, гидрогеологов и т. д.). В результате появилась бы возможность многокритериальной оценки различных показателей состава пресных питьевых вод, классификации их по сводному показателю качества. Подобные методы анализа объектов довольно хорошо отработаны в математике [6], однако, для их применения необходим эталон, относительно которого должна быть проведена нормализация признаков, отражающих экологическое качество природных вод.

С учетом достаточной сложности поставленных вопросов на кафедре гидрогеологии Санкт-Петербургского университета создается международная программа оценки качества природных пресных вод, в которой мы приглашаем принять участие все заинтересованные организации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабенко Г. А. О роли нарушения обмена металлов в патохимии болезней // Физиологическая роль и практическое применение микроэлементов. Рига, 1976. С. 211—225.
- Зеленый мир. 1992. № 3—4.
- Ковалевский В. В. Геохимическая среда, здоровье, болезни // Физиологическая роль и практическое применение микроэлементов. Рига, 1976. С. 177—192.
- Кузнецов С. Р., Орлов С. Н., Чурина С. К. Влияние низких концентраций кальция и магния в питьевой воде на транспорт одновалентных катионов и кальция в эритроцитах нормотензивных крыс // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1991. № 5. С. 471—473.
- Ноздрюхина Л. Р., Грекевич Н. И. Нарушение микроэлементного обмена и пути его коррекции. М., 1980. 280 с.
- Хованов Н. В. Математические основы теории шкал измерения качества. Ленинград, 1982. 185 с.
- Чурина С. К. Эколо-физиологические аспекты формирования артериальной гипертензии в условиях Ленинграда // Физиологический журнал. 1988. № 11. С. 1615—1622.

Санкт-Петербургский
государственный университет

Поступила в редакцию

16.XI.1993

УДК 664.138.4 : 556.3.06

© 1995 г. Т. Г. МАКЕЕВА, Р. И. ЗЛОЧЕВСКАЯ, В. А. ТРОФИМОВ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

Рассмотрены закономерности диффузационного переноса щелочных растворов NaOH в водонасыщенных глинистых грунтах. Изложены методики исследования параметров сорбции, кинетики сорбции, диффузии без учета и с учетом процессов сорбции в дисперсных грунтах. Установлены основные закономерности гетерогенных процессов и изучена природа поглотительной способности последних при взаимодействии их со щелочными растворами. Создана количественная физическая модель и на ее основе составлен прогноз миграции щелочных растворов за счет процессов диффузии для однородных, изотропных глинистых грунтов на примере способа защелачивания. Установлено пространственно-временное распределение концентрации щелочных растворов и положение фронта загрязнения при использовании этого способа закрепления в водонасыщенных глинистых грунтах при диффузационном переносе. Опыт и расчеты показали, что дальность распространения щелочных растворов для конечного источника существенно локальна и при диффузационном перемещении составляет величину одного порядка с размером зоны начального загрязнения, а через некоторое время происходит полное поглощение щелочки грунтом, что подтверждает экологическую безопасность применения нового химического способа закрепления глинистых грунтов «защелачиванием».

Интенсификация хозяйственной деятельности человека все более остро ставит проблему прогноза изменения геологической среды под воздействием различных техногенных растворов. Промышленные стоки и утечки растворов из коммуникации химических заводов и других объектов, а также широкое использование различных химических способов технической мелиорации могут явиться существенными факторами риска загрязнения окружающей среды.

В последнее время широкое распространение при освоении непригодных для строительства земель и реконструкции зданий получили различные способы искусственного закрепления грунтов, среди которых все большее значение приобретают щелочные способы, обладающие высокой степенью технологичности и относительно низкой стоимостью.

В этой связи разработка подхода, позволяющего рационально выбрать и использовать химические методы закрепления грунтов в конкретных инженерно-геологических условиях, в настоящее время весьма актуальна. Решение этой проблемы основывается на научном прогнозе миграции щелочных растворов в горных породах.

При этом эффективность прогнозирования геохимических процессов и успешное моделирование их в большой степени зависят от степени изученности физико-химической природы взаимодействия твердой и жидкой фаз и сопутствующих миграции растворов явлений. Следует, однако, отметить, что этот круг вопросов освещен в научной литературе крайне недостаточно, особенно это касается

Таблица 1

Характеристика состава и свойств исследуемых грунтов

| Название грунта, возраст, генезис | Дисперсность грунтов, % | | | Плотность грунта ρ , $\text{г}/\text{см}^3$ | Пористость n , % | Влажность воздушно-сухого грунта W_r , % | Пределы пластичности, % | |
|--|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|--------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | песчаная фракция 0,5—0,05 мм | пылеватая фракция 0,05—0,001 мм | глинистая фракция <0,001 мм | | | | влажность верхнего предела, W_L , % | влажность нижнего предела, W_p , % |
| Каолин положский, eN ₁ | 2,2 3,9 | 48,1 93,6 | 49,7 2,5 | 1,6 | 63 | 1,0 | 55 | 38 |
| Синяя кембрийская глина, Е ₁ | 12,2 14,4 | 38,6 43,6 | 49,2 42,0 | 1,36 | 61 | 2,0 | 47 | 30 |
| Асканит, Ф ₂ | 23,0 42,1 | 66,0 55,8 | 11,0 2,1 | 1,17 | 76 | 12,0 | 106 | 72 |
| Суглинок, арQ _{III} (г. Колхозабад) | 8,4 23,7 | 85,6 75,5 | 6,0 0,8 | 1,65 | 45 | 0,8 | 29 | 22 |
| Суглинок, dQ _{III} (г. Уфа) | 13,0 47,4 | 57,5 49,8 | 29,5 2,8 | 1,8 | 58 | 4,0 | 44 | 25 |

Примечание. В числителе — гранулометрический, в знаменателе — микроагрегатный состав.

миграции концентрированных щелочных растворов в слабофильтрующих глинистых грунтах (с коэффициентом фильтрации $K_f < 0,1 \text{ м}/\text{сут}$).

В данной работе рассмотрен механизм диффузационной миграции щелочных растворов в глинистых грунтах с учетом сорбционных процессов и изложена методика прогноза распространения в таких грунтах щелочных растворов широкого спектра концентраций.

Миграция растворов в глинистых грунтах с коэффициентом фильтрации ниже 0,1 м/сут определяется преимущественно законами молекулярной диффузии [2, 3, 11, 16, 17]. Диффузционное распространение щелочных растворов в глинистых грунтах изучалось экспериментальным путем в лабораторных и полевых условиях и с помощью методов математического моделирования. При этом экспериментальная проработка методики прогноза распространения щелочных растворов в глинистых грунтах, проведенная в лабораторных и полевых условиях, позволила установить закономерности и получить исходные данные, описывающие процессы при практическом использовании химических способов закрепления грунтов, а именно способа «защелачивания» [4].

Математическое моделирование происходящих процессов в глинистых грунтах базировалось на использовании уравнений диффузии и кинетики взаимодействия твердой и жидкой фаз.

Объектами экспериментальных исследований служили природные мономинеральные глины: каолинитовые, монтмориллонитовые, гидрослюдистые — и образцы полиминеральных суглинков и глин нарушенного и естественного сложения. Состав и свойства исследованных грунтов представлены в табл. 1.

Методика экспериментальных исследований

Закономерности диффузационного массопереноса щелочных растворов в водонасыщенных глинистых грунтах изучались в 2-камерной кювете из оргстекла объемом $6 \times 5 \times 18 \text{ см}^3$. В одну (большую) камеру помещался образец исследуемого

грунта, имеющего влажность, близкую к верхнему пределу пластичности (W_L), и плотность ($\rho \sim 1,6 \text{ г/см}^3$, а во вторую (меньшую) заливался определенный объем щелочи (40 мл) 8 н. концентрации. Кюветы герметически закрывались и оставлялись на 3, 7 и 14 сут для взаимодействия грунта и раствора при диффузии последнего в грунт. Предельное время взаимодействия t лимитировалось длиной кюветы (L), что связано с необходимостью выполнения условия [14]

$$L > 5 \sqrt{\frac{D}{n} t}, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии, n — пористость. После окончания опыта по всей длине образца в камере отбирались пробы грунта (через 1 см) для последующего определения в них влажности (W) и концентрации раствора (C_v) щелочи (по данным водной вытяжки соотношения 1 : 10 [7] путем титрования ее кислотой по индикатору «метиловому красному» [1]). По полученным данным были построены графики распределения поровой концентрации (C_v) по длине образца (L) на разные промежутки времени (t). На основе этих данных с использованием решения уравнения диффузии (без учета сорбции) для полубесконечной области для различных значений времени t была сделана оценка комплексного миграционного диффузионного параметра (D/n), который послужил основой для последующих прогнозных расчетов.

Поскольку массоперенос щелочных растворов корректировался сорбционными процессами, параллельно с миграционными параметрами изучались закономерности сорбции щелочных растворов глинистыми грунтами.

В опытах по изучению сорбции в статических условиях навеску измельченного в порошок грунта (P) помещали в герметически закрывающуюся емкость из органического стекла и заливали определенным объемом растворов щелочи различных концентраций, $C_{\text{нач}}$ от 0,1 до 10 н. NaOH , в соотношении $T : \mathbb{X} = 1 : 10$, где T — твердая фаза взаимодействующей компоненты грунта, \mathbb{X} — жидккая фаза раствора [7]. Суспензию регулярно перемешивали. Через определенные промежутки времени (1, 7 и 14 сут, 1 и 3 мес) фильтрат анализировали на ионы OH^- (методом титрования кислотой 0,1 н. HCl по индикатору «метиловому красному»), при этом определяли его текущую условно-равновесную концентрацию C_v . На основании полученных данных рассчитывали количества адсорбированного вещества (OH^-) по формуле

$$q = \frac{(C_0 - C_v) V}{P} \cdot 100, \quad (2)$$

где V — объем всего взаимодействующего раствора, C_0 и C_v — начальная и текущая концентрации раствора, P — навеска грунта, 100 — пересчет на 100 г грунта. Опыты продолжались до установления полного равновесного состояния системы при каждой концентрации раствора, когда концентрация взаимодействующего раствора C_v достигала предельного постоянного (максимального) значения C_0 , т. е. ($C_v = C_0$), а величина сорбции соответствовала предельной величине поглощения q_0 . Серия аналогичных опытов для различных начальных концентраций раствора ($C_{\text{нач}}$) позволила построить для каждого исследованного грунта изотерму сорбции, т. е. зависимость $q_0 = f(C_0)$. При прогнозных расчетах миграционных параметров удобно использовать не величину q_0 , а величину N_0 (N_0 — количество граммов вещества, сорбированного 1 cm^3 грунта):

$$N = \frac{q \rho_{\text{ск}}}{100 n}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ск}}$ — плотность скелета грунта, n — пористость.

Форма полученных экспериментальных кривых изотерм сорбции с достаточ-

ной степенью точности аппроксимируется зависимостью, установленной Ленгмюром:

$$q = \frac{aC}{1 + bC}. \quad (4)$$

Неизвестные параметры a и b для исследованных грунтов были определены по следующей методике. На экспериментальной кривой $q_0 = f(C_0)$ были выбраны две произвольные точки, не лежащие на горизонтальном участке кривой (в области насыщения), например (q_0', C_0') и (q_0'', C_0'') . Подстановка их в (4) дает систему уравнений, из которой параметры a и b определяются соотношениями

$$a = q_0' \left[1 + \frac{q_0'' C_0' - q_0' C_0''}{C_0' (q_0' - q_0'')} \right], \quad b = q_0' q_0'' \frac{(C_0' - C_0'')}{C_0' C_0'' (q_0' - q_0'')}. \quad (5)$$

Кинетика сорбции из ограниченного объема при начальной концентрации щелочи $C_{\text{нач}}$ описывается экспериментальной зависимостью $q = f(t)$, на основании которой были определены константы скорости сорбции в статических условиях. Для этого полученные зависимости для удобства обработки были перестроены в полулогарифмическом масштабе в координатах t и $\lg(q)$ и по двум произвольным точкам графика был найден угловой коэффициент прямой $\frac{\partial q'}{\partial t}$.

Из соотношения (2) определим величину C_v :

$$C_v = C_{\text{нач}} - \frac{q(t') P}{100V}, \quad (6)$$

т. е. это концентрация раствора в момент t' . После этого величину скорости сорбции (a) вычислим из уравнения Нернста [5]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = a (C_v - C), \quad (7)$$

где C — концентрация раствора, связанная с концентрацией адсорбированного вещества q уравнением изотермы сорбции

$$C = \frac{q(t')}{a - bq(t')}.$$

После этого из соотношения (7) находим величину скорости сорбции a :

$$a = \frac{\frac{\partial q(t')}{\partial t}}{C_v(t') - \frac{q(t')}{a - bq(t')}}. \quad (8)$$

Справедливость применения уравнения кинетики сорбции была подтверждена независимостью величины a от выбранного момента времени t' и начальной концентрации щелочи $C_{\text{нач}}$ в определенном диапазоне концентраций.

Особенности миграции щелочных растворов в насыщенных грунтах за счет диффузионных процессов

Сорбционные процессы. Описанная методика использована в ходе изучения сорбции щелочных растворов выбранных для исследования глинистых грунтов. В частности, были построены зависимости поглощения растворов щелочи грунтом (q) от равновесной (предельной) концентрации щелочных растворов (C_0), т. е. изотермы сорбции (рис. 1, б), а также зависимости, отражающие кинетику сорбции

Таблица 2

Параметры сорбции щелочных растворов исследуемых грунтов

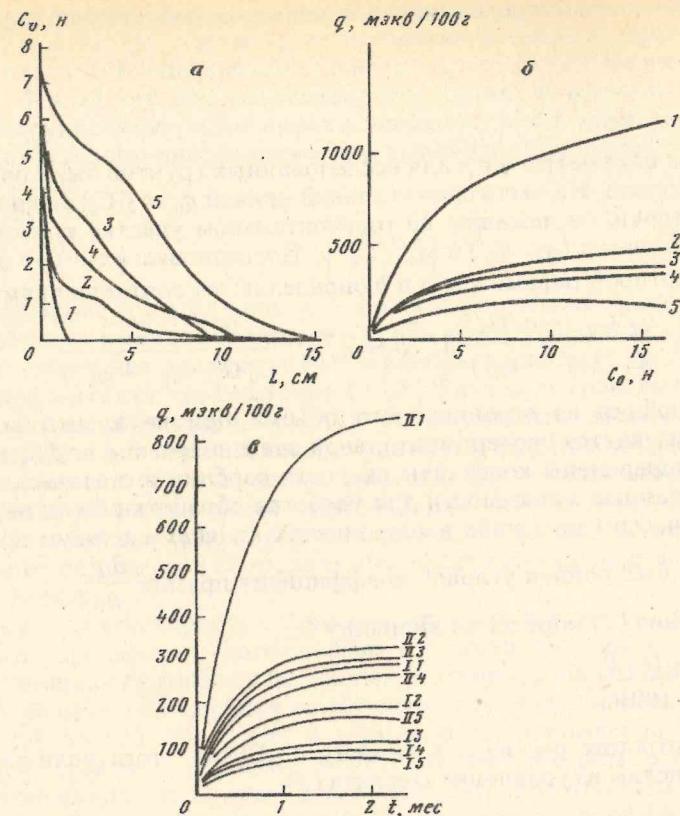


Рис. 1. Зависимости основных характеристик гетерогенных процессов с щелочными растворами NaOH от дисперсности глинистых грунтов: а — изменение концентрации ионов OH^- в поровом растворе грунтов через 1 нед взаимодействия с 8 н. раствором NaOH в зависимости от расстояния L ; б — изотермы сорбции исследованных грунтов; в — кинетика сорбции щелочных растворов грунтами при начальных концентрациях $C_{\text{нач}}$ 1 н. (I) и 5 н. (II) NaOH ; I — монтмориллонитовая глина; 2 — каолинитовая глина; 3 — гидрослюдистая глина; 4 — суглинок ар Q_{III} (г. Уфа); 5 — суглинок ар Q_{III} (г. Колхозабад)

щелочи грунтами (рис. 1, в). Поглощение щелочи грунтом связано с особенностями строения глинистых минералов и существенно зависит от величины их удельной поверхности, которая определяется дисперсностью и минеральным составом. С увеличением дисперсности грунтов поглощение растворов щелочи возрастает. При этом существенное влияние на поглощение щелочи оказывает минеральный состав, что обусловлено особенностями взаимодействия глинистых минералов со щелочными растворами и их устойчивостью в щелочной среде [7, 9, 11]. Среди мономинеральных образцов максимальным поглощением щелочных растворов обладают монтмориллонитовые и каолиновые глины, минимальным — гидрослюдистые.

Вид полученных изотерм позволяет считать, что для аналитического описания их может быть использовано соотношение изотермы Ленгмюра при соответствующем выборе параметров a и b (табл. 2).

На изотерме сорбции можно условно выделить два участка. Первый, начальный участок кривой, круто поднимающийся вверх при концентрациях раствора щелочи $C_{\text{нач}} \leq 1$ н., когда сорбция щелочи грунтом, по-видимому, обусловлена в основном физико-химическим обменным поглощением Na^+ из раствора. При этом обменная емкость грунтов связана как с существующим обменным комплексом в нейтральной среде, так и с дополнительной обменной способностью его в щелоч-

| Название, возраст, генезис грунтов, место отбора | Константа скорости сорбции 5 н. NaOH 1/сут | Параметры изотермы сорбции Ленгмюра | | Предельное поглощение $q_{\text{пред}} \text{ м-ЭВ/г}$ | Константа скорости сорбции 1 н. NaOH , 1/сут | Коэффициент распределения изотермы Генри $\beta = 1/K_{\Gamma}$ |
|---|---|--|--|--|---|---|
| | | a | b | | | |
| | | $\text{см}^3/\text{г}$ | | | | |
| 1. Каолин положский, е N_1 Синяя кембрийская глина, ϵ_1 Асканит, P_2 Суглинок, а Q_{III} , г. Уфа Фракция $<0,005$ мм Фракция $0,01—0,05$ мм Суглинок (лесс), ар Q_{III} (г. Колхозабад) | 0,33 0,275 0,825 0,247 — — 0,22 | 6,9 6,4 18,4 8,32 21,5 8,06 5,75 | 11,5 14,0 12,5 16,6 48,8 27,8 25,0 | 5,99 4,57 14,75 4,65 4,07 2,69 2,30 | — — — — 4,5—32,0 2,7—13,7 | — — — — 0,1 0,06 |

ной среде за счет диссоциации поверхностных структурных гидроксильных групп OH^- и обмена H^+ из них на Na^+ [8, 12, 15]. Как хемосорбция, так и физико-химическая обменная сорбция щелочи формально могут рассматриваться как необратимый вид химической сорбции. Наличие второго, менее наклонного участка (при $C_{\text{нач}} > 1$ н.) характеризуется меньшей скоростью возрастания поглощения щелочи от концентрации. При этом, по-видимому, сорбционные процессы поглощения щелочи происходят за счет преимущественно поверхностного растворения кристаллической решетки минералов и образования из продуктов растворения новых химических соединений (гидроалюмосиликатов натрия, гидроксидов кальция, магния, алюминия и т. д.) [4, 7, 9, 11, 17].

Таким образом, сорбция щелочных растворов высоких концентраций глинистыми и лессовыми грунтами происходит преимущественно по химическому механизму взаимодействия, является необратимым процессом и может быть аналитически описана соотношением (4).

На основе опытных данных (рис. 1, в) по изучению кинетики сорбции растворов щелочи глинистыми грунтами были рассчитаны величины константы скорости сорбции (табл. 2). При концентрациях $C_{\text{нач}} \leq 1$ н. NaOH равновесное состояние наступает быстрее, чем при $C_{\text{нач}} > 1$ н. NaOH . Величина коэффициента скорости сорбции грунтом растворов щелочи малых концентраций (<1 н.) в 10—100 раз больше величины коэффициента скорости сорбции растворов щелочи больших концентраций, что обусловлено различным типом механизмов поглощения: физико-химическим (обменным) и химическим (необменным). В обоих случаях (в отличие от физической сорбции) процесс поглощения щелочи в данных условиях среды является необратимым. Кинетика сорбции щелочных растворов лежит во внешнедиффузионной области и описывается соответствующими кинетическими уравнениями.

Для малых концентраций (≤ 1 н.) кинетика поглощения растворов щелочи грунтом достаточно хорошо описывается уравнением

$$\frac{\partial N}{\partial t} = a' (C_v - \beta N), \quad (9)$$

где $\beta = 1/K_{\Gamma}$; K_{Γ} — константа Генри; a' — константа скорости сорбции.
Для больших концентраций (> 1 н.)

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные параметры диффузионной миграции растворов щелочи в водонасыщенных глинистых и лёссовых грунтах

| Название, возраст, генезис грунтов, место отбора | Влажность W , % | Пористость n , % | $D/n \cdot 10^4$, $\text{м}^2/\text{сут}$ | $D_{\text{эфф}} \cdot 10^4$, $\text{м}^2/\text{сут}$ | Продвижение фронта l_r , м через 7 дней с учетом поглощения | Средний радиус пор R , нм | Извилистость пор λ | Максимальное продвижение фронта l_m , м | Время полного поглощения щелочи t_m , сут |
|--|-------------------|--------------------|--|---|---|-----------------------------|----------------------------|---|---|
| Каолин пологий, eN ₁ | 54 | 68 | 0,70 | 0,48 | 0,13 | 639 | 0,46 | 0,27 | 2350 |
| Синяя кембрийская глина, C ₁ (г. Ленинград) | 40 | 63 | 0,53 | 0,33 | 0,09 | 311 | 0,35 | 0,23 | 1500 |
| Асканит, P ₂ | 82 | 70 | 0,022 | 0,015 | 0,02 | 24 | 0,015 | 0,06 | 1750 |
| Суглинок, аQ _{III} (г. Уфа) | 50 | 52 | 1,50 | 0,78 | 0,11 | 80 | 1,00 | 0,26 | 765 |
| Суглинок, арQ _{III} (г. Колхозabad) | 30 | 53 | 0,76 | 0,40 | 0,17 | 96 | 0,51 | 0,36 | 2600 |

$$\frac{\partial N}{\partial t} = a \left(C_v - \frac{N}{a - bN} \right), \quad (10)$$

где a — константа скорости сорбции.

Диффузионные процессы. Закономерности диффузионного распространения щелочных растворов 8 н. концентрации NaOH в лабораторных экспериментах иллюстрируются на рис. 1, *a* и в табл. 3.

В табл. 3 приведены значения эффективных ($D_{\text{эфф}}$) и приведенных (D/n) коэффициентов диффузии для 8 н. щелочных растворов NaOH при полном их водонасыщении без учета процессов сорбции. Известно, что коэффициенты диффузии водонасыщенных грунтов зависят в первую очередь от характера пористости, т. е. размера пор, который в свою очередь определяется дисперсностью и минеральным составом. Как видно из табл. 3, величина эффективного коэффициента диффузии уменьшается с увеличением дисперсности. Среди мономинеральных грунтов наибольшим значением $D_{\text{эфф}}$ обладает каолинитовая глина, наименьшим — монтмориллонитовая, а гидрослюдистая занимает промежуточное положение. При этом диапазон изменения эффективного коэффициента диффузии для изученных грунтов невелик и составляет (0,33—0,78) · 10⁻⁴ м²/сут.

Значения эффективных коэффициентов диффузии растворов щелочи в порах грунта, в отличие от подобных величин для свободных растворов ($D_{\text{ист}}$), зависят от пористости, извилистости путей диффузии, тормозящего влияния осмотических потоков и т. д. Для одного и того же типа грунта значения D находятся в прямой зависимости от размера пор. Как видно из табл. 3, приведенные значения коэффициентов диффузии (D/n) при $W = W_L$ для изученных грунтов меньше коэффициентов диффузии в свободном растворе в 2—4 раза, что обусловлено, по всей видимости, тормозящим влиянием скелета грунта, т. е. извилистостью путей диффузии. Отношение величин (D/n)/ D является параметром, характеризующим извилистость путей диффузии (λ). Следует заметить, что у монтмориллонитовой глины значение этого параметра на порядок меньше, что связано, по-видимому, не только с особенностями геометрии порового пространства, но и с возникающими в этих глинах осмотическими потоками, препятствующими диффузии, значение которых возрастает с уменьшением размера пор [3, 10, 13].

Сопоставление экспериментальных кривых $C_v = F(L)$ диффузионного распространения щелочных растворов 8 н. концентрации NaOH для исследованных грунтов с учетом процессов сорбции (рис. 1, *a*) с данными, полученными для этих же грунтов при диффузионных процессах, показало, что они в значительной степени отличаются от закономерностей миграции при диффузионных процессах. Установлено, что происходит более интенсивное падение поровой концентрации растворов щелочи в исследованных грунтах в зависимости от времени. Наибольшие изменения при диффузионных процессах наблюдаются у монтмориллонитовой и каолинитовой глин, а гидрослюдистые и полиминеральные грунты подвержены им в меньшей степени; полученные результаты согласуются с данными по поглощению щелочных растворов при статической сорбции (рис. 1, *b*).

Математическая модель диффузионного массопереноса щелочного раствора и прогнозные расчеты

Изучение миграции щелочных растворов NaOH в водонасыщенных глинистых грунтах в условиях метода «зашелачивания» было проведено также и при помощи методов математического моделирования.

Принимая во внимание тот факт, что глинистый грунт в той или иной мере поглощает щелочь, процесс диффузии щелочных растворов в водонасыщенных грунтах с достаточной степенью точности описывался системой дифференциальных уравнений в частных производных (11): уравнениями материального баланса

и кинетики сорбции (7) при соответствующих начальных (12) и граничных (13) условиях:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial N}{\partial t} = a \left(C - \frac{N}{a - bN} \right); \end{cases} \quad (11)$$

$$C(r, 0) = \begin{cases} C_{\text{нап}}, & 0 \leq r \leq r_0, \\ 0, & r > r_0, \end{cases} \quad t = 0; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial r}(0, t) &= 0, & t > 0, \\ C(0, t) &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$$N(r, 0) = 0, \quad t = 0,$$

где D — коэффициент диффузии; r_0 — начальный радиус распространения раствора щелочи при закачке его в грунт через скважину при $t = 0$, r — радиус распространения раствора щелочи при $t > 0$. Из-за невозможности получения аналитического решения для выписанной системы уравнений в конечном виде [5] процесс миграции щелочи исследовался численными методами. Для этого система уравнений (11) — (13) аппроксимировалась по «явной схеме» следующими конечно-разностными уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{C_i^{t+\Delta t} - C_i^t}{\Delta t} + \frac{N_i^{t+\Delta t} - N_i^t}{\Delta t} &= D \left[\frac{C_{i+1}^t - 2C_i^t + C_{i-1}^t}{\Delta r^2} + \frac{C_{i+1}^t - C_i^t}{r \Delta r} \right], \\ \frac{N_i^{t+\Delta t} - N_i^t}{\Delta t} &= a \left(C_i^t - \frac{N_i^t}{a - bN_i^t} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Определяющим параметром устойчивости явной конечно-разностной схемы для уравнения диффузии является величина

$$P = D \frac{\Delta t}{\Delta r^2}, \quad (15)$$

которая для обеспечения устойчивости не должна превышать 0,5, т. е.

$$P < 0,5. \quad (16)$$

Расчеты, проведенные для нелинейной системы (14), показали, что в этом случае при выполнении неравенства (16) используемая конечно-разностная схема (14) является устойчивой.

Выбор разностной схемы (14) позволяет достаточно просто выявить основные закономерности происходящих процессов. Работоспособность предлагаемой конечно-разностной схемы была проверена для двух крайних случаев, имеющих место при диффузионной миграции растворов. В первом случае были рассмотрены чисто диффузионные процессы (при $a = 0$, поглощение отсутствует), во втором случае $D = 0$, т. е. происходило поглощение раствора щелочи без ее пространственного переноса. При этом подтверждено совпадение численного и аналитического решений при заданных граничных условиях. Кроме того, проведена серия расчетов для различных промежуточных значений параметров D и a , варьирующихся в диапазоне от 0 до реальных значений, полученных в экспериментах. Для проведения практических расчетов на основании соотношений (14) был разработан алгоритм и составлена программа для ЭВМ. Расчеты проводились в рамках описанной выше модели с использованием параметров (D/n , a , a , b), полученных из опытов диффузионного распространения вещества и

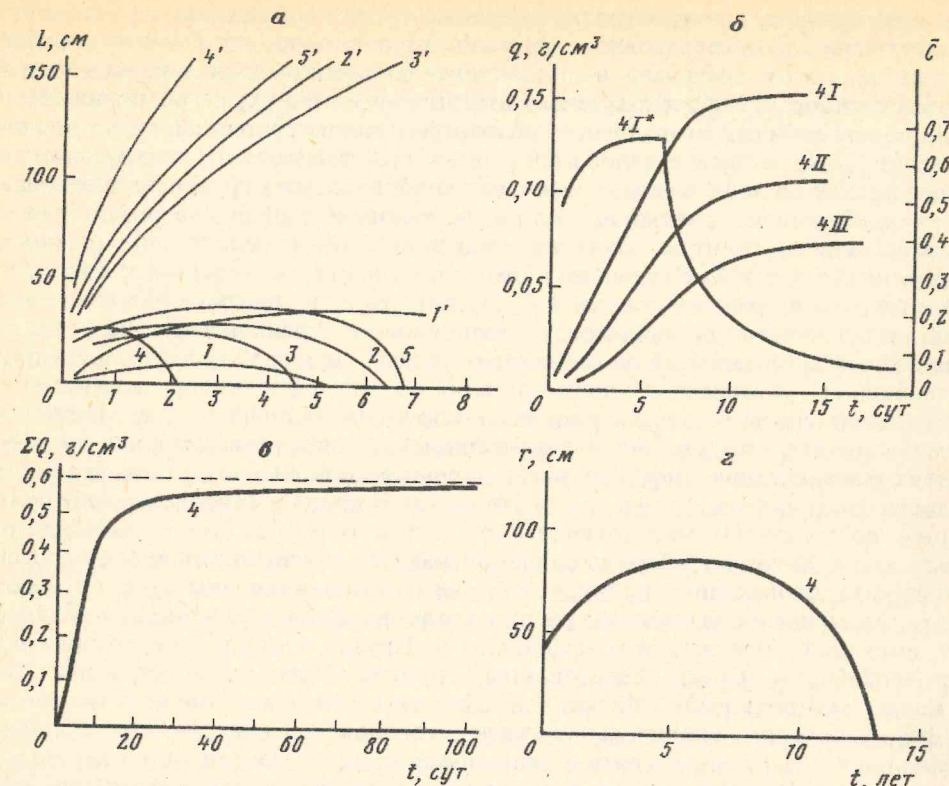


Рис. 2. Зависимость пространственно-временного распределения концентрации щелочных растворов 8 н. NaOH от миграционных параметров: а — прогноз изменения положения фронта щелочных растворов в водонасыщенных глинистых грунтах в зависимости от времени без учета сорбции (кривые со штрихом) и с учетом сорбции (кривые без штриха); 1—5 — см. рис. 1; б — кинетика поглощения растворов щелочи при диффузионном ее перемещении в водонасыщенном суглинке аQIII (г. Уфа) от времени на расстояния: I — 1 см; II — 2 см; III — 3 см (кривая I* — изменение относительной концентрации (C) щелочи в порах грунта на расстоянии 1 см от источника во времени t); в — зависимость суммарного поглощения растворов щелочи (ΣQ) при диффузионном распространении 8 н. концентрации NaOH в водонасыщенном суглинке аQIII (г. Уфа) от времени t ; г — прогнозный расчет кинематики движения фронта загрязнения для однородных, изотропных суглинков аQIII (г. Уфа)

данных статической сорбции. При этом концентрация на фронте загрязнения была принята за 10^{-4} н., что несколько превышает ПДК, принятую в нормативных документах (предельно допустимая концентрация 10^{-5} н.).

На рис. 2, а представлено изменение положения фронта загрязнения для конечного источника в зависимости от времени. Семейство кривых 1'—5' на рис. 2, а описывает положение фронта чисто диффузионного переноса щелочи (без учета поглощения) для исследованных грунтов. Кривые имеют параболический вид и иллюстрируют практически неограниченное распространение загрязняющих веществ. Для постоянного источника дальность распространения загрязнения может быть асимптотически оценена в зависимости от времени по формуле (1).

В данном случае для конечного источника дальность миграции щелочи принципиально ограничена. Она определяется количеством внесенной в грунт щелочи, принятой величиной ПДК и сорбционными параметрами грунта.

Учет поглощения щелочи грунтом существенным образом изменяет характер миграционных процессов. Кривые 1—5 на рис. 2, а описывают положение диффузионного фронта загрязнения с учетом поглощения для изученных грунтов. Из рисунка видно, что максимальная дальность продвижения фронта загрязнения в условиях данного опыта лежит в пределах 6—36 см для различных грунтов. При этом в течение некоторого предельного времени (от 1 года до 3,5 лет), различного

для разных грунтов, фронт загрязнения движется по направлению от источника, а по достижении этого предельного времени скорость сорбции начинает преобладать над скоростью диффузии и направление движения фронта изменяется на противоположное, т. е. фронт начинает отступать к источнику загрязнения. Через некоторое время после этого фронт, на котором концентрация раствора щелочи составляет ПДК, достигает начала координат, т. е. происходит практически полное поглощение щелочи, а ее максимальная концентрация в грунте не превышает ПДК. В дальнейшем происходит полное исчезновение щелочи в результате ее взаимодействия с грунтом. Значение максимальной (предельной) дальности продвижения (l_m), а также время полного исчезновения щелочи (t_m) для исследованных грунтов приведены в табл. 3. Расчеты показали, что значения этих параметров в основном определяются величиной коэффициента диффузии и максимальной поглощающей способностью грунта. Анализ полученных результатов позволяет установить характер влияния коэффициентов диффузии и максимальной способности поглощения щелочи на величины l_m , t_m . При этом следует заметить, что увеличение коэффициента диффузии, с одной стороны, приводит к возрастанию диффузионного переноса щелочи, что должно увеличить дальность продвижения фронта, а с другой — этот процесс сопровождается более быстрым поглощением мигрирующего вещества и в результате наблюдается уменьшение величины t_m . При увеличении максимальной поглощающей способности грунта происходит значительное уменьшение величины l_m и t_m . Таким образом, наименьшей дальностью распространения фронта загрязнения обладает грунт, имеющий наименьший коэффициент диффузии и максимальную поглощающую способность. Среди исследованных грунтов такими свойствами обладает монтмориллонитовая глина. Из остальных грунтов можно выделить суглинок а_{Q_{III}} (г. Уфа), у которого значительная поглотительная способность и наибольший коэффициент диффузии. В связи с этим время полного поглощения щелочи для него максимальное. Что касается остальных грунтов, то параметры движения фронта для них определяются совокупным влиянием указанных выше двух противоположных тенденций.

Очевидно, что поглощение щелочи не будет равномерным по длине образца. Проведенные расчеты позволяют представить характер поглощения щелочи в зависимости от расстояния от источника и прошедшего времени. На рис. 2, б приведены кривые, отражающие кинетику поглощения щелочи суглинком а_{Q_{III}} (г. Уфа) в некоторых фиксированных точках образца (I — $X = 1$ см; II — $X = 2$ см; III — $X = 3$ см). Подобные зависимости характерны и для других точек образца. На том же рисунке приведена кривая (I*), отражающая изменение концентрации щелочи в точке $X = 1$ см от времени. Из графиков I, II, III рис. 2, б видно, что в каждой фиксированной точке образца происходит постепенное нарастание количества поглощенной щелочи (q или N) в течение некоторого промежутка времени, зависящего от положения рассматриваемой точки. По истечении этого промежутка поглощение прекращается, о чем свидетельствуют горизонтальные участки кривых I, II, III. При этом можно заметить, что чем ближе точка к источнику, тем больше величина $q_{\text{пред}}$ и меньше время насыщения t_n . Такая закономерность становится понятной, если принять во внимание, что процесс поглощения в каждой фиксированной точке идет до тех пор, пока скорость поглощения $\frac{\partial q}{\partial t}$ не станет равной нулю. В соответствии с уравнением кинетики поглощения (7) при этом должно выполняться равенство

$$\left(C - \frac{q_n}{a - bq_n} \right) = 0, \quad (17)$$

которое и определяет величину q_n . Ясно, что для более удаленных от источника точек концентрация щелочи в порах грунта C , меньше ввиду диффузионного ее распространения и поглощения. В силу этого из соотношения (17) следует, что и

величина q_n уменьшается по мере удаления от источника. Из этих соображений понятно, что на больших расстояниях скорость поглощения меньше, что объясняется взаимное расположение кривых I, II, III.

При этом при достижении «насыщения» поглощения в каждой данной точке концентрация щелочи не падает до нуля, а определяется соответствующей изотермой сорбции. Например, для точки $X = 1$ см, для которой насыщение наступает через 11 сут, концентрация в этот момент составляет 1,3 н. NaOH. Вследствие этого в тех частях образца, где произошло «насыщение» щелочью, будет наблюдаться чисто диффузионный перенос в область активного поглощения, которая с течением времени постепенно удаляется от источника. На рис. 2, в показана зависимость суммарного поглощения щелочи грунтом от времени для суглинка а_{Q_{III}} (г. Уфа). По расчетным данным (табл. 3), полное поглощение 8 н. щелочи до ПДК происходит за 765 дней, однако основное ее количество (80%) поглощается за 25 дней.

Соотношение (17) позволяет оценить роль параметра a (скорости сорбции) в процессе переноса щелочи. Поскольку скорость поглощения пропорциональна этой величине, то этот параметр в основном определяет величину t_m — время полного исчезновения щелочи и оказывает малое влияние на $q_{\text{пред}}$ — предельное поглощение.

Таким образом, учет поглощения щелочи грунтом существенным образом изменяет представление о характере миграционных процессов и позволяет говорить об ограниченной области, подверженной загрязнению в течение некоторого промежутка времени.

Помимо рассмотренной линейной задачи, при помощи которой удалось установить закономерности распространения щелочных растворов во времени и пространстве для грунтов различного состава и свойств, была решена радиальная задача миграции щелочных растворов для конкретных инженерно-геологических условий. Расчеты были проведены по миграционным параметрам, полученным в лабораторных условиях, для интервала скважины, находящегося ниже уровня грунтовых вод в однородной толще аллювиальных суглинков а_{Q_{III}} (г. Уфа), мощностью 10—15 см, в которую было закачано 600 л 8 н. раствора щелочи NaOH. После образования защелоченной зоны радиусом $r = 60$ см раствор щелочи начинает мигрировать по пласту за счет процессов диффузии во все стороны. Оценка дальности распространения фронта загрязнения и времени полного поглощения была проведена в предположении, что весь поток направлен в горизонтальном направлении и обладает цилиндрической симметрией. Результаты расчета приведены на рис. 2, г, где показано положение фронта загрязнения в зависимости от времени. Как следует из рис. 2, г поведение фронта загрязнения такое же, как и для случая распространения щелочи при решении линейной задачи, т. е. сначала фронт загрязнения движется от источника и по мере поглощения щелочи грунтом начинает отступать. При этом максимальная дальность загрязнения от источника составляет, по расчетам, 86 см, которая достигается за 6,5 лет. Расчетное время полного поглощения раствора щелочи составляет порядка 13 лет.

При этом следует иметь в виду следующие обстоятельства. Во-первых, при расчетах были использованы данные, полученные для грунтов нарушенного сложения, перенесение которых на грунты естественного залегания может привести к заметным расхождениям. Во-вторых, в рамках использованной методики определения миграционных и сорбционных параметров также возможен некоторый разброс определяемых величин. И в-третьих, при проведении прогнозных расчетов использована довольно простая модель массопереноса с взаимодействием. Это обусловлено в первую очередь малой изученностью протекающих процессов и отсутствием их формализованного описания [6]. В некоторой степени этот недостаток использованной модели был преодолен путем введения некоторого эффективного коэффициента диффузии $D_{\text{эфф}}$, который может быть определен на основании натурных замеров дальности миграции щелочи из скважины. С другой

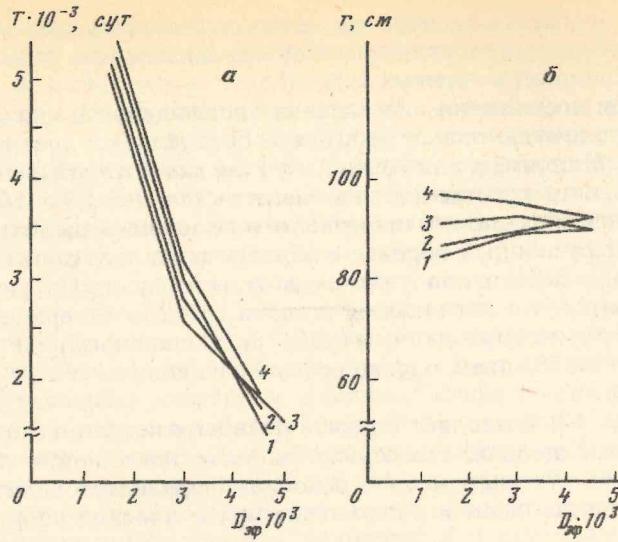


Рис. 3. Зависимости основных характеристик миграционного процесса от точности прогнозных оценок: а — зависимость длительности полного поглощения щелочи от коэффициента диффузии; б — зависимость максимальной дальности продвижения фронта от коэффициента диффузии (1 — $m = 1$; 2 — $m = 10$; 3 — $m = 20$; 4 — $m = 50$)

стороны, была усложнена модель процесса миграции путем введения зависимости коэффициента скорости сорбции a от концентрации щелочи. В этом случае использовалась ступенчатая зависимость

$$a = \begin{cases} a_0, & C > C^* \\ ma_0, & C < C^*, \end{cases} \quad (18)$$

где m — некоторое целое положительное число (при расчетах принималось равным 1, 10, 20, 50); C^* — некоторое условное граничное значение концентрации (0,5 н.).

В рамках этой усложненной модели были проведены расчеты с целью изучения зависимости максимальной дальности продвижения фронта (r) и длительности полного поглощения (T) щелочи от коэффициента диффузии $D_{\text{эфф}}$. Результаты приведены на рис. 3, а, б. Характер полученных зависимостей позволяет оценить точность прогнозных оценок. Кривым 1—4 на этих рисунках соответствуют значения параметра m соответственно 1, 10, 20, 50. Полученные результаты показывают, что дальность распространения фронта загрязнения в малой степени подвержена влиянию как величины $D_{\text{эфф}}$, так и параметра m . Таким образом, точность определения коэффициента диффузии в известных пределах не оказывает существенного влияния на прогноз дальности распространения. Что касается времени полного поглощения, то и здесь наблюдается слабая зависимость от m , однако имеется очень сильная зависимость от $D_{\text{эфф}}$. При изменении $D_{\text{эфф}}$ в пределах 1,5— $4,5 \cdot 10^{-4}$ м²/сут величина T уменьшается более чем в 2,5 раза от 13 до 5 лет. В связи с этим прогноз времени полного поглощения T может оказаться менее точным и колебаться в значительных пределах.

Таким образом, проведенные оценки позволяют говорить о достаточной точности прогноза дальности распространения загрязнения и относительно малой точности определения времени полного поглощения щелочи при диффузионном переносе, что следует учитывать при прогнозировании миграционных процессов в полевых условиях.

Натурные наблюдения за изменением концентрации растворов щелочи вблизи

зашелоченного массива глинистого грунта подтвердили указанный характер миграции щелочных растворов, обуславливая локальность ее распространения лишь в начальный период времени [4], а по мере преобладания скорости поглощения над скоростью диффузии фронт загрязнения начинает отступать, при этом снижается поровая концентрация растворов щелочи.

Таким образом, экспериментально-теоретические исследования и натурные наблюдения, проведенные в течение нескольких лет, показали, что за счет диффузионных процессов и активного взаимодействия щелочных растворов с глинистыми грунтами с течением времени происходит практически полное поглощение щелочи (до ПДК).

Выводы

1. Разработана методика определения поглотительной способности грунтов по отношению к щелочным растворам. Установлены основные закономерности гетерогенных процессов в глинистых грунтах при взаимодействии их со щелочными растворами. Поглощение щелочных растворов глинистыми грунтами зависит от их дисперсности и минерального состава и для концентрированных растворов описывается уравнением типа изотермы Ленгмюра. Получены количественные зависимости процессов кинетики сорбции глинистыми грунтами щелочных растворов различных концентраций, при этом показано, что эти процессы лежат во внешнедиффузионной области и описываются соответствующими кинетическими уравнениями. Установлено, что коэффициент скорости сорбции грунтом щелочи малых концентраций (< 1 н.) в 10—100 раз больше такого же коэффициента для растворов щелочи больших концентраций (> 1 н.). Изучена природа поглотительной способности дисперсных грунтов различного минерального состава и дисперсности относительно щелочных растворов.

2. Разработана комплексная методика оценки и прогноза распространения щелочных растворов (с использованием ЭВМ) широкого спектра концентраций в глинистых грунтах за счет молекулярной диффузии с учетом процессов сорбции применительно к лабораторным и полевым условиям и на ее основе составлен прогноз миграции щелочных растворов в порах глинистых грунтов при постинъекционных условиях. В результате решения плоской и радиальной задач (с помощью ЭВМ) установлено пространственно-временное распределение концентрации щелочных растворов и положение фронта «загрязнения» при распространении щелочных растворов различных концентраций из конечного источника в водонасыщенных глинистых грунтах различного состава при диффузионном переносе. Учет поглощения щелочи грунтом существенным образом изменяет характер миграционных процессов: первоначально в течение некоторого предельного времени, различного для разных грунтов, фронт «загрязнения» движется от источника (скорость миграции превышает скорость поглощения щелочи), а затем направление движения фронта изменяется на противоположное (скорость поглощения превалирует) и через некоторое время концентрация «загрязнителя» достигает нуля, т. е. происходит полное поглощение щелочи грунтом. Натурные опыты подтвердили полученные расчетные данные, показав сугубо локальный (< 1 м) характер распространения щелочных растворов вблизи источника после их закачки и наличие обратного направления движения фронта «загрязнителя» через несколько месяцев.

Опыт и расчеты показали, что дальность распространения щелочных растворов (для конечного источника) в изученных грунтах существенно локальна и при диффузионном перемещении составляет величину одного порядка с размером зоны начального загрязнения. При этом время полного поглощения щелочи грунтом при молекулярной диффузии в области загрязнения составляет порядка 10 лет и нескольких месяцев за пределами зоны «загрязнения».

3. Разработанная методика позволяет прогнозировать состояние и перемещение любых химических растворов в порах водонасыщенных дисперсных грун-

тов для конечного источника за счет процессов диффузии и оценить возможное воздействие этих растворов на геологическую среду. Кроме того, применение разработанного подхода дает возможность рационально выбрать и использовать химические методы закрепления грунтов в конкретных инженерно-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. Брилинг И. А., Злочевская Р. И., Волков Ф. Е. и др. Оценка распространения щелочных растворов в глинистых породах//Инж. геология. 1987. № 2. С. 37—46.
3. Брилинг И. А., Рошаль А. А., Чичекина Л. А. Диффузия ионов и сопутствующие процессы в каолине//Вестн. МГУ. Сер. геол. 1978. № 3. С. 86—93.
4. Волков Ф. Е., Злочевская Р. И. Новый химический способ закрепления водонасыщенных лессовых и глинистых пород — «зашелачивание»//Инж. геология. 1988. № 1. С. 15—30.
5. Голубев В. С., Гарбянц А. А. Гетерогенные процессы геохимической миграции. М.: Недра, 1968. 192 с.
6. Жуховицкий А. А., Шварцман Л. А. Физическая химия. М.: Металлургия, 1976. 544 с.
7. Злочевская Р. И., Волков Ф. Е., Макеева Т. Г. и др. Взаимодействие глинистых и лессовых пород с концентрированными щелочными растворами. Ч. 1. Химическое преобразование состава пород//Инж. геология. 1990. № 2. С. 33—51.
8. Злочевская Р. И., Дивисилова В. И., Куприна Г. А., Сергеев Е. М. Исследование взаимодействия глин с кислыми и щелочными растворами в процессе их набухания//Связанная вода в дисперсных системах. Вып. 3. М.: Изд-во МГУ, 1974. С. 4—20.
9. Злочевская Р. И., Макеева Т. Г., Дивисилова В. И. Особенности сорбционного взаимодействия лессовых пород с техногенными щелочными растворами при их диффузационном перемещении//Инженерная геология лессовых пород. Т. 2. Ростов н/Д., 1989. С. 66—67.
10. Кульчицкий Л. И., Габибов Ф. Г., Ткаченко Ю. Г. Определение проникаемости глин//Разведка и охрана недр. 1986. № 10. С. 51—54.
11. Макеева Т. Г. Обоснование прогноза миграции щелочных растворов в глинистых грунтах. М., 1988. 9 с.—Деп. в ВИНТИ 17.06.88, № 4780—В.88. С. 11—19.
12. Никольский Б. П., Парамонова В. И. Обменная способность и условная емкость обмена почв//Уч. зап. МГУ. Сер. хим. наук. 1945. № 79. Вып. 7. С. 3—14.
13. Рельтов Б. Ф., Новицкая Н. А. Осмотические явления в связанных грунтах при неравномерном их засолении//Изв. ВНИИГ. 1954. Т. 51. С. 94—123.
14. Рошаль А. А. Методы определения миграционных параметров. М.: ВНИЭМС, 1980. 62 с.
15. Тарасевич Ю. И. Строение и химия поверхности слоистых силикатов. Киев: Наук. думка, 1988. 247 с.
16. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1973. 327 с.
17. Volkov F. E., Zlochevskja R. I., Makeeva T. G., Divisilova V. I. Alkaline solutions sorption in clays and problems of surroundings//Proc. 7-th European Clay Conference. Dresden, Germany, August 26—29. 1991. Ernst-Moritz-Arndt-Universität. V. 3. Greifswald, 1991. P.1139—1144.

МГУ
ИПКОН РАН

Поступила в редакцию
1.XI.1993

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

2 · 1995

УДК 624.131

© 1995 г. В. И. ОСИПОВ, С. Д. ФИЛИМОНОВ, С. В. ШЕШЕНИН,
Л. В. МУРАВЛЕВА

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНОЙ ПЛИТЫ ГЕОТЕХНОГЕННОГО МАССИВА¹

В статье описаны результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния основного элемента геотехногенного массива — грунтоцементной плиты. Изучалось напряжено-деформированное состояние под ленточными фундаментами зданий в зависимости от толщины грунтоцементной плиты, ширины фундаментных лент и расстояния между фундаментными лентами. Ширина фундаментных лент при одинаковой величине удельной нагрузки определяет мощность грунтоцементной плиты. В зависимости от ширины ленты фундамента и начиная с определенного расстояния между ними происходит наложение напряженного состояния от соседних лент. Грунтоцементная плита является достаточно хорошим распределительным элементом.

Введение

Основным элементом геотехногенного массива, создаваемого на просадочных грунтах [1], является так называемая «грунтоцементная плита», которая располагается в активной зоне здания или сооружения и является основным несущим элементом. Грунтоцементная плита представляет собой природно-техногенный композит с хаотической структурой, в которой матрицей является лишенный просадочных свойств уплотненный лессовый грунт, а жесткими включениями — застывший уплотняющий раствор. В зависимости от размеров грунтоцементной плиты изменяются несущая способность геотехногенного массива и затраты на его изготовление. В связи с этим очень важным становится вопрос оптимизации размеров грунтоцементной плиты. Для решения данной задачи было проведено математическое моделирование по изучению напряженно-деформированного состояния грунтоцементной плиты различной мощности в зависимости от параметров фундаментных плит и величины нагрузки.

В работе моделировалось напряжено-деформированное состояние под ленточными фундаментами зданий. Поскольку длина фундаментов значительно пре-восходит их поперечные размеры, а нагрузка, будучи перпендикулярной продольной оси, не меняется вдоль нее, в качестве модели была выбрана плоская задача теории упругости. В соответствии с этим давление фундаментов рассматривалось как действие равномерно распределенной нагрузки по площади фундаментов.

¹ Настоящая работа выполнена в рамках проекта «Теория и методы улучшения свойств горных пород на основе создания геокомпозитов», поддержанного Российским фондом фундаментальных исследований.

Методика исследований

Грунтоцементная плита является элементом сложной гетерогенной структуры, поэтому расчет напряженно-деформированного состояния с учетом всех неоднородностей является достаточно затруднительным. Однако можно рассматривать данный композиционный материал как однородный, у которого другие свойства выражаются через эффективные модули. Это означает, что при переходе через границу контакта векторы перемещений и усилий непрерывны.

Для численного решения данной задачи воспользуемся вариационно-разностным методом, который заключается в следующем. Вводится равномерная сетка с числом узлов N_a по оси x_a , $a = 1, 2$. Сеточная функция $u^h(i, j)$, $i = 1, \dots, N_1$, $j = 1, \dots, N_2$ представляет собой дискретный аналог вектора перемещения $\bar{u}(x)$.

Выписывается функционал Лагранжа в разностном виде $L^h(u^h)$, т. е. производные заменяются разностными производными, а интегралы — соответствующими суммами. Так как в положении равновесия функционал Лагранжа (лагранжиан) имеет минимум, то разностную систему можно получить, приравнивая нулю производные Лагранжа по неизвестным переменным

$$u_a^h(i, j);$$

$$\frac{\partial L^h}{\partial u_a^h(i, j)} = 0. \quad (1)$$

Разностная система уравнений (1) решается с помощью итерационного метода переменных направлений с чебышевским набором итерационных параметров. С помощью программы, реализующей описанный метод, определены перемещения, по которым рассчитаны деформации и напряжения в области.

Полученные результаты приведены в виде карты изолиний вертикальных напряжений.

С целью подбора оптимальных параметров грунтоцементной плиты было проведено математическое моделирование ее напряженно-деформированного состояния в зависимости от следующих факторов: толщины грунтоцементной плиты, числа фундаментных лент, их ширины и расстояния между ними.

Для всех моделей одинаковыми были следующие условия:

а) эффективный модуль деформации грунтоцементной плиты был принят равным 15 МПа (по штамповым испытаниям); б) модуль деформации окружающего массива для упрощения расчетов был взят равным модулю деформации водонасыщенного уплотненного и непросадочного лесового массива и составлял 7,0 МПа.

Для всех вариантов модели массива лесового грунта с грунтоцементной плитой в активной зоне неизменными оставались такие параметры, как: мощность массива лесового грунта — 8 м, расстояние между крайней точкой моделируемого фундамента и границей грунтоцементной плиты — 2 м; удельное давление от фундамента — 0,2 МПа, число лент фундамента — 3.

Полученные результаты

Ниже приводятся результаты изучения напряженно-деформированного состояния грунтоцементной плиты в зависимости от исследуемых параметров.

Толщина грунтоцементной плиты. Для определения влияния толщины грунтоцементной плиты (ГЦП) на распределение напряжений и деформаций в массиве был использован вариант плиты с тремя фундаментами шириной 1 м с расстоянием между ними 5 м. Толщина ГЦП изменялась от 3 до 6 м (рис. 1).

Установлено, что для плит с фундаментами шириной 1 м оптимальной толщиной ГЦП можно считать 4 м. При толщине ГЦП в 3 м (рис. 1, а) изогипсы

как вертикальных, так и касательных напряжений выходят за ее пределы, и значительное по величине напряжение передается в подстилающий лесовой массив. При толщине ГЦП 4 м (рис. 1, б) напряжения под плитой распределяются равномерно и составляют лишь 15% прикладываемой нагрузки. Применение же ГЦП более 4 м (рис. 1, в, г) не имеет смысла, так как при этом напряженное состояние изменяется мало (по сравнению с предыдущим вариантом), а стоимость создания ГЦП повышается.

Ширина фундаментных лент. Наиболее наглядно влияние ширины фундаментных лент на напряженно-деформированное состояние ГЦП проявилось для фундамента, состоящего из 4 лент (рис. 2).

Как видно из графиков распределения вертикальных напряжений в 3-метровой по мощности ГЦП, с ростом ширины фундаментной ленты от 1 до 3 м увеличивается размер активной зоны вследствие возрастания общей нагрузки на основание. При этом в случае метровой ленты фундамента активная зона не выходит за пределы ГЦП (рис. 2, а), под 3-метровой лентой фундамента за пределами ГЦП образуются зоны локальных концентраций напряжений (рис. 2, в), а при ширине фундаментной ленты 2 м эти зоны практически равны по мощности грунтоцементной плиты (рис. 2, б). То же самое происходит и с касательными напряжениями. Это означает, что мощность грунтоцементной плиты должна определяться шириной фундамента при равной удельной нагрузке, зависящей от общей нагрузки от сооружения. И если удельной нагрузке 0,2 МПа для ширины фундамента в 1 м мощность ГЦП должна составлять 4 м, то при ширине лент 2 м — уже 5 м. При ширине же фундаментных лент 3 м мощность ГЦП должна быть не менее 7 м (рис. 2, в).

Расстояние между фундаментными лентами. Изучение влияния расстояния между фундаментными лентами на распределение напряжений и деформаций проводилось для трех разных вариантов ширины фундаментных лент. Рассмотрим последовательно все три варианта.

Вариант 1. Ширина фундаментной ленты 1 м (рис. 3, 4). При уменьшении расстояния между фундаментными лентами с 12 до 3 м наблюдается определенная закономерность. Так, при расстоянии 12 м между зонами напряженного состояния непосредственно под фундаментными лентами располагаются зоны нулевых вертикальных напряжений шириной около 7 м (рис. 4, в). При расстоянии 9 м эта зона сжимается внутри грунтоцементной плиты до 4 м (рис. 4, б). Когда же расстояние между фундаментными лентами уменьшается до 6 м, зона свободная от напряжений между лентами фундамента сохраняется только в первых 2 м по глубине (рис. 4, а), а при расстоянии 3 м (рис. 3, а) напряженное состояние от каждого из фундаментов накладывается друг на друга и внутри грунтоцементной плиты создается сплошное поле напряжений. Кроме того, за счет наложения напряжений увеличивается глубина их распространения. Наличие подобного слияния напряжений говорит о необходимости создания сплошной грунтоцементной плиты при расстоянии между фундаментами 3—6 м. Важно также и то, что в этом случае под грунтоцементной плитой образуется практически равномерно распределенное напряженное состояние (рис. 3, а). Особенно отчетливо это проявляется для варианта 2-метровой ширины фундамента и расстояния между фундаментами 3 м (рис. 3, б), что позволяет говорить о грунтоцементной плите как о распределительном элементе вертикальных напряжений.

Варианты 2 и 3. При ширине фундаментных лент 2 и 3 м наблюдается та же закономерность, что и при $l = 1$ м. Разница заключается в том, что в этих случаях наложение и увеличение напряжений от фундаментных лент наступает при расстоянии меньшем 6 м. Это наложение также приводит к увеличению глубины распространения напряжений в массиве, что требует в свою очередь увеличения мощности ГЦП. Распределительные же свойства грунтоцементной плиты полностью реализуются только при расстоянии между плитами менее 3 м.

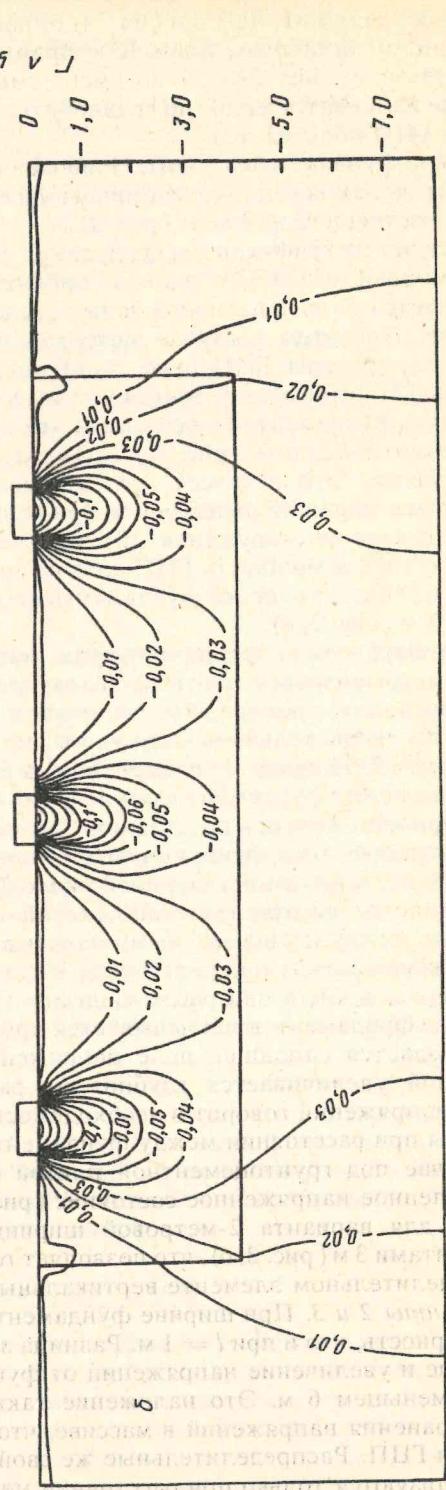
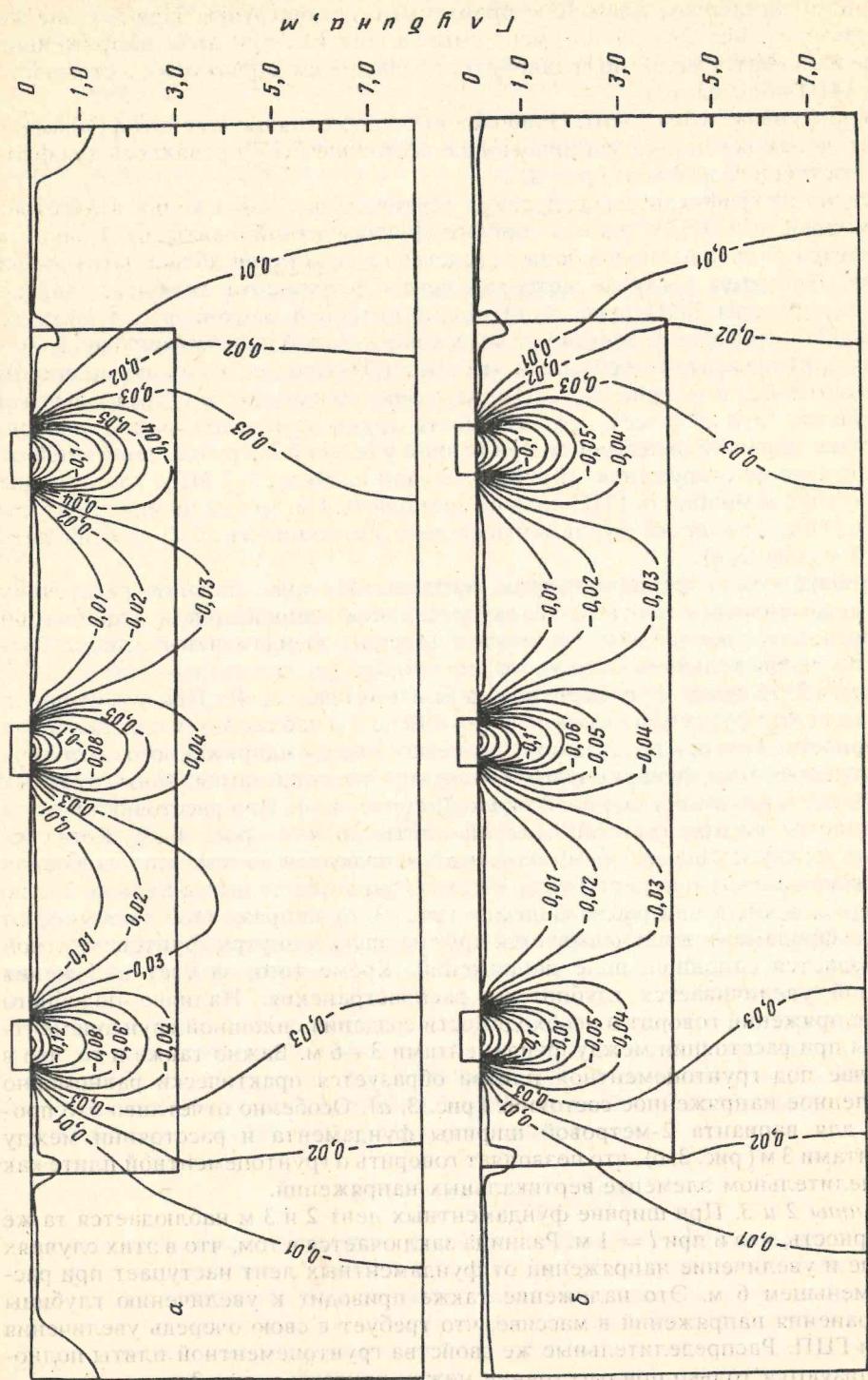
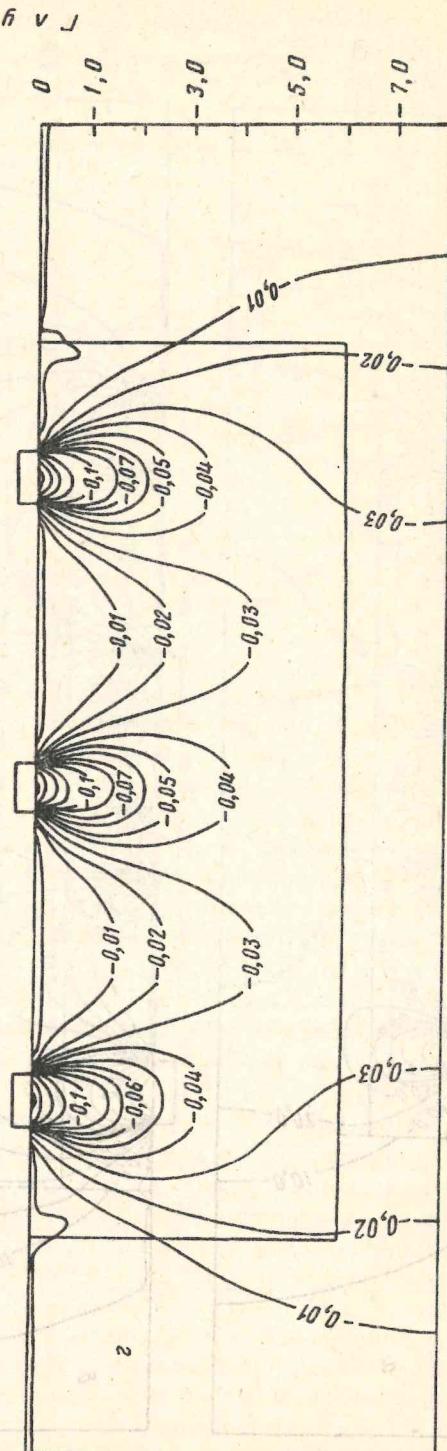
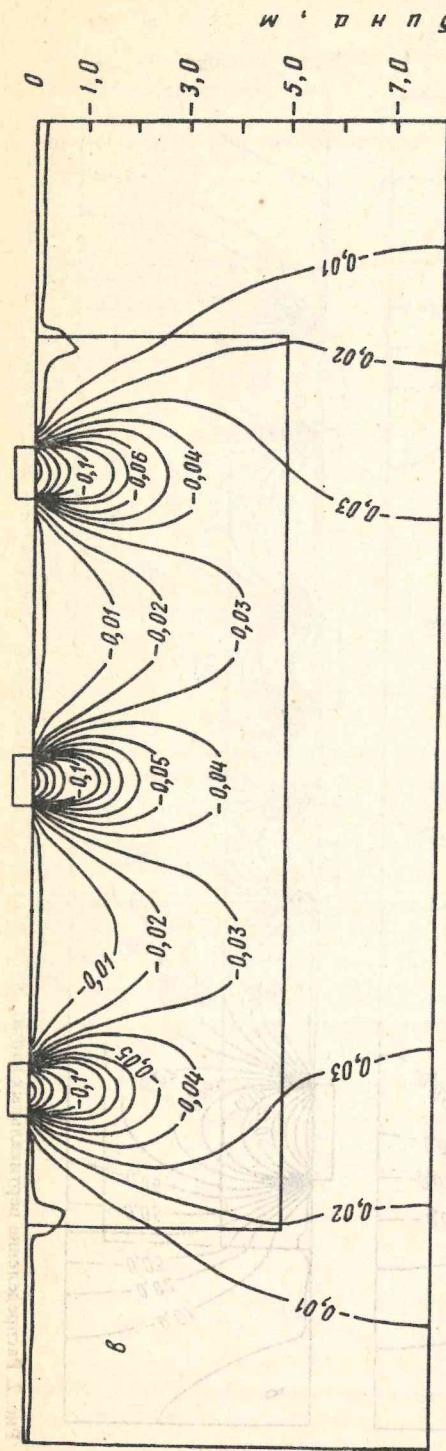


Рис. 1. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в ГЦП и массиве под ленточными фундаментами шириной 1 м. Мощность ГЦП, м:

$\alpha = 3, \delta = 4, \epsilon = 5, z = 6$



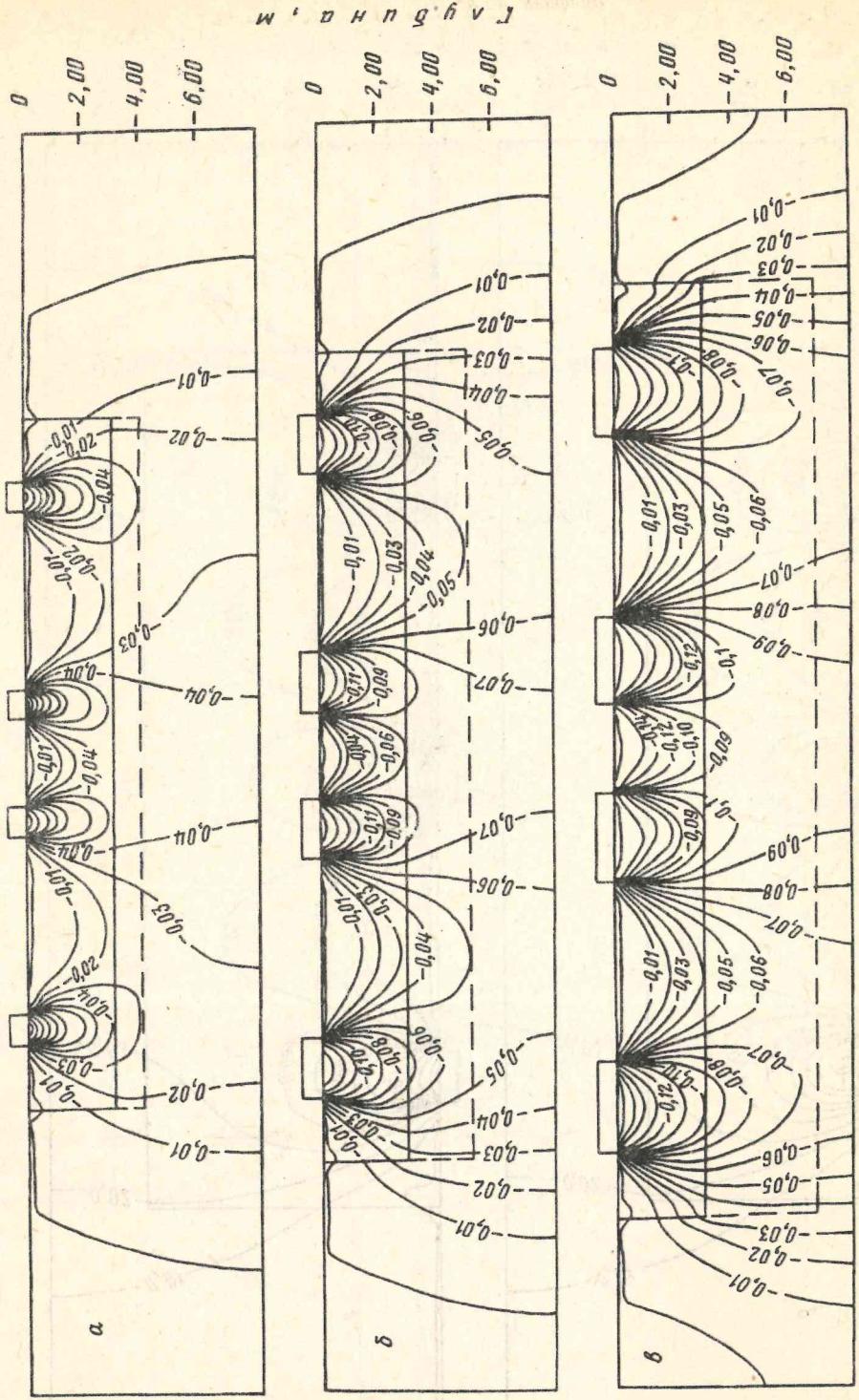


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в ГЦП и массиве под фундаментом из 4 лент шириной 1 м: а — 1, б — 2, в — 3

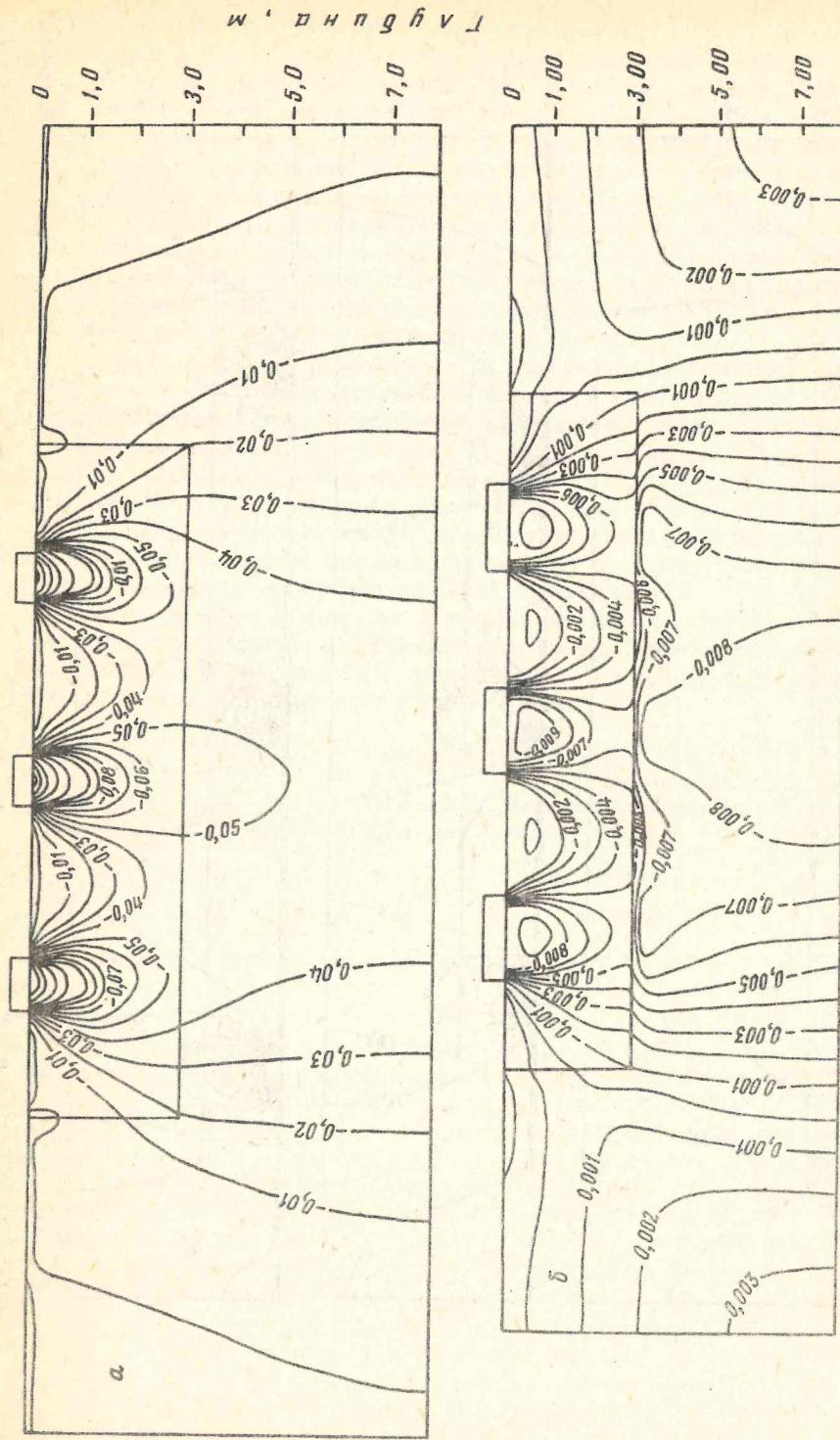


Рис. 3. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в ГЦП и массиве под фундаментами шириной 1 (а), 2 м (б), расчетные между лентами — 3 м

Выводы

Проведенные исследования по математическому моделированию напряженно-деформированного состояния грунтоцементной плиты позволяют сделать следующие выводы.

1. Ширина фундаментных лент при одинаковой величине удельной нагрузки является главным фактором для определения мощности грунтоцементной плиты. Так, для метровой ширины ленты эта мощность составляет 4 м, для 2-метровой — 5 м и для лент шириной 3 м мощность ГЦП должна быть не менее 7 м.

2. В зависимости от ширины ленты фундамента, начиная с определенного расстояния между фундаментными лентами (6 м при ширине фундамента 1 м), происходит наложение напряженного состояния от соседних лент и соответственно возрастание глубины его распространения в массиве, что приводит к необходимости увеличения мощности грунтоцементной плиты.

3. Грунтоцементная плита является достаточно хорошим распределительным элементом, поэтому, изменяя мощность ГЦП в зависимости от параметров фундаментов, можно достичь практически равномерно-распределенного напряженного состояния под ГЦП.

4. Оптимальная толщина грунтоцементной плиты должна рассчитываться для каждого конкретного варианта ленточного фундамента исходя из следующих двух условий: а) все основные напряжения должны поглощаться ГЦП и б) оставшиеся напряжения должны равномерно распределяться под ГЦП. В этом случае реализуется распределительный эффект ГЦП.

Для определения оптимальной мощности ГЦП в зависимости от параметров ленточных фундаментов и удельной нагрузки необходимо разработать сервисную программу для математического моделирования и производить расчеты мощности ГЦП для каждого конкретного случая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мельников Б. Н., Иваненко В. И., Осипов В. И., Несторов А. И. Принципы создания геотехногенных массивов и методов их расчета // Инж. геол. 1986. № 5. С. 23—32.

ИГЦ РАН

Поступила в редакцию
13.XII.1993

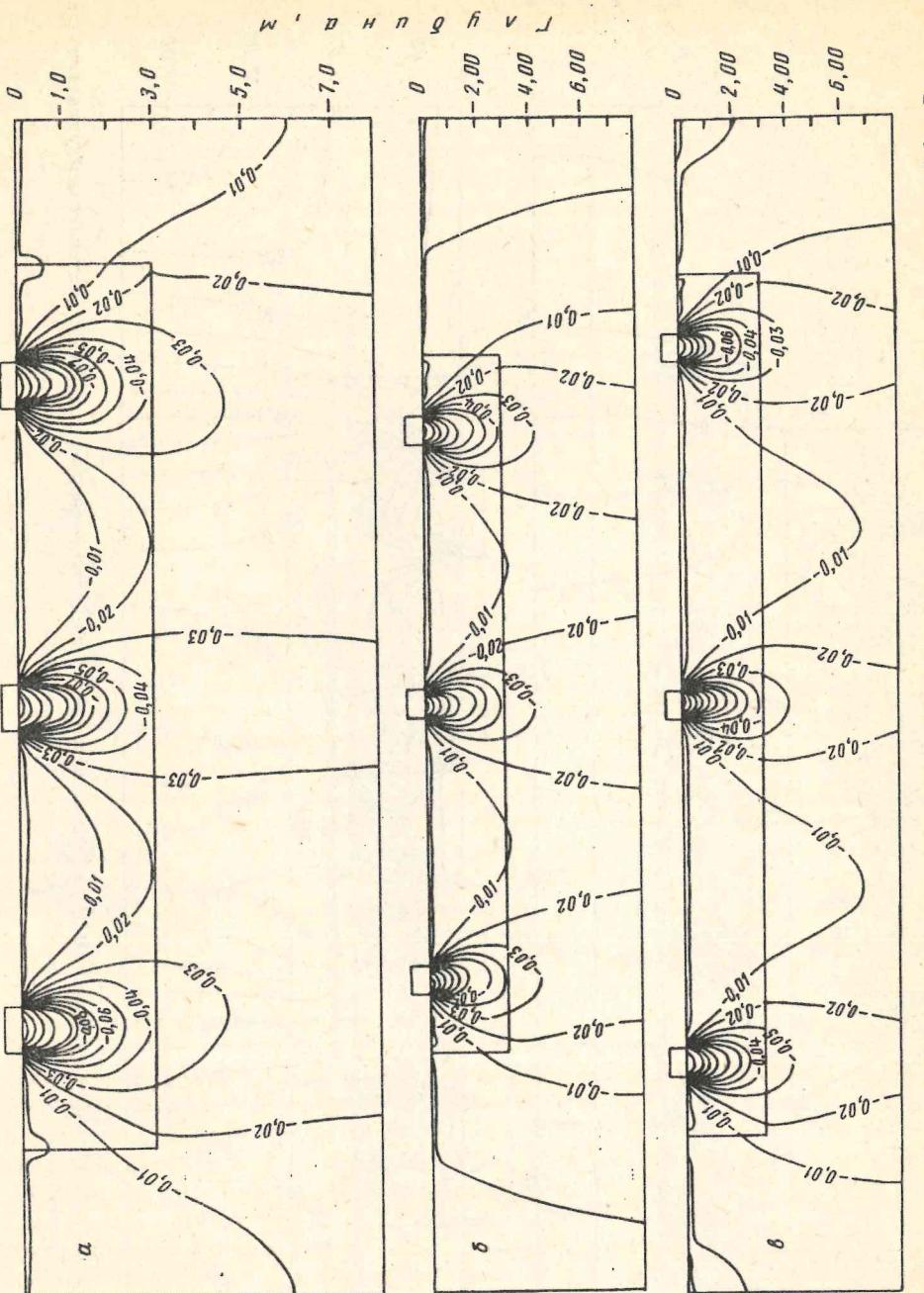


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в ГЦП и массиве под ленточными фундаментами шириной 1 м. Расстояние между фундаментами, м: а — 6, б — 9, в — 12

УДК 556.3.02/04:622.271.3

© 1995 г. А. Н. РЮМИН

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЯ КАРЬЕРА № 3 ПРИКАСПИЙСКОГО ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Дано описание и проведен анализ оползня-обрушения. Использованы теоретические методы прогноза деформаций бортов, сложенных осадочными породами. Приведены данные полевых определений влажности и замеров порового давления на устойчивом рабочем борту карьера, подтверждающие гипотезу о послойных деформациях массива глин под влиянием горизонтальной разгрузки.

В связи с серией крупных, катастрофического характера оползней, произошедших на карьерах, появились публикации [1—3], в которых механизм формирования оползней бортов, сложенных «переуплотненными» глинами, связывается с эффектом так называемого гравитационного клина, стакивающего призму упора в выработанное пространство. В самом деле, на оползнях такого типа наблюдается интенсивное проседание поверхности прибортовой зоны при одновременном отодвигании бортового массива подобно тому, как если бы погружающийся клин раздвигал расклиниваемый массив. Однако при более глубоком анализе видно, что аналогия разрушения бортов с работой жесткого клина не может служить основой для расчета деформаций, поскольку зона «клина» фактически является зоной растяжения (а не сжатия), а сам клин не погружается ниже поверхности скольжения. Предложенная автором [5, 7] схема развития деформаций бортов карьеров как следствия горизонтальной разгрузки массива вокруг выемки апробирована при анализе обрушения борта карьера № 3 ПГМК.

Деформирование прибортовой зоны проходит несколько этапов мобилизации прочности горного массива и его ослабления при снятии нагрузки. Вначале в зоне выемки происходит «вертикальное» разуплотнение пород уступов и «горизонтальное» разуплотнение пород прибортового массива, его сдвижения под влиянием бокового распора. За счет горизонтальных деформаций, накапливающихся в прибортовой зоне, формируются ослабленные контакты; бортовой массив (призма упора) работает на изгиб, подобно толстой плите переменной жесткости, защемленной по бокам и снизу, нагруженной силами бокового распора, освобожденными при проходке выемки. По достижении бортом состояния предельного равновесия ослабленный бортовой массив может разрушиться, причем разрушение может либо носить плавный характер, если прочность массива по поверхности скольжения обусловлена трением (или вязкостью), либо иметь вид обрушения, когда в прочности пород преобладает сцепление, либо вид потока при высоких напорах подземных вод и одновременном отсутствии сцепления и трения в рыхлых слабых отложениях. В работе [5] был предложен метод прогноза деформаций бортов, сло-

женных осадочными породами. Предлагаемая публикация посвящена апробации теоретических рекомендаций на практике и углублению и детализации подходов к осмыслению процессов деформирования глинистых толщ.

1. ТЕОРИЯ ПРОГНОЗА СМЕЩЕНИЙ БОРТА

1.1. Напряженное состояние

Смещения бортов карьеров обусловлены горизонтальными силами, возникающими задолго до обрушения борта. Горные породы, нагруженные собственным весом, являются средой, в которой наряду с гравитационной нагрузкой $\sigma_z = \gamma h$ (γ — объемный вес породы, h — глубина рассматриваемой точки) существуют распорные горизонтальные напряжения:

$$\text{в массиве, не вскрытом выработкой, } -\sigma_x = \sigma_y = \zeta_0 \gamma h,$$

$$\zeta_0 = v/(1 + v), \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0;$$

в массиве, вскрытом одной траншеей вдоль оси y ,

$$-\sigma_x = \zeta_x \gamma h, \varepsilon_x = 0, \varepsilon_y \neq 0;$$

в массиве, вскрытом двумя траншеями вдоль осей y и x , на контуре борта $\sigma_x = \sigma_y = 0, \varepsilon_x \neq \varepsilon_y \neq 0$, в удалении от борта $0 < \sigma_x < \zeta_0 \gamma h, 0 < \sigma_y < \zeta_0 \gamma h$. (Здесь v — коэффициент Пуассона, $\zeta = \sigma_x/\sigma_z$, ось z вертикальна, оси x, y лежат в горизонтальной плоскости.)

Массив горных пород после проходки разрезной траншеи вдоль оси y становится полубесконечным, на контуре борта снятого горизонтальное напряжение эквивалентно приложению растягивающей нагрузки интенсивностью $\sigma_x = \zeta_0 \gamma h$, вызывающей горизонтальные деформации, реализация которых ведет к соответствующему уменьшению горизонтальных напряжений в зоне влияния выработки L_x . Круг Мора из положения σ_x, σ_{x1} переходит в положение σ_x, σ_{x2} (рис. 1, а). Если дополнительно пройдена поперечная траншея вдоль оси x , то аналогичный процесс сдвижения массива параллельно оси y приведет к формированию области разгрузки $0 < y < L_y$; при этом в окрестности начала координат, где $\sigma_x = \sigma_y = 0$, массив будет находиться в условиях одноосного сжатия (круг 3, рис. 1, а).

Процесс разуплотнения лимитируется пределом прочности на сжатие [σ]:

$$[\sigma] = 2cb^{1/2}/(1 - b\zeta), \quad (1)$$

где c — сцепление, $b = (1 + \sin \phi)/(1 - \sin \phi)$, ϕ — угол трения.

Разрушение наступает при $[\sigma] = \sigma_z' = \gamma' h$ (σ_z' — эффективное максимальное напряжение, $\gamma' = \gamma p/h$, p — давление воды на глубине h).

Разгрузка глин в борту карьера сопровождается снижением величины порового давления, что в условиях аридного климата способствует сохранению значений эффективных напряжений σ_{z1}' , близких к исходным. Поскольку $\sigma_{z1}' < \sigma_z'$, то на графике прочности (рис. 1, б) центр круга Мора смещается влево, что может привести к разрушению глин. Если в некоторой области массива «переуплотненных» глин достигнут предел прочности на сжатие [6], то после разрушения глины при сохранении весовой нагрузки должен резко возрасти боковой распор, как это видно на рис. 1, г. Интенсивность деформаций массива горных пород зависит от разности между горизонтальными напряжениями до и после разрушения.

В случае, если разрушение массива слабых «чувствительных» глин обусловлено ростом порового давления (рис. 1, в), порода, потеряв сцепление, ведет себя подобно вязкой жидкости (рис. 1, д). После разжижения скорость течения вязкой жидкости $v = m_0/\mu (\tau - \tau_0)$, где m_0 — мощность, μ — вязкость жидкости (рис. 1, е).

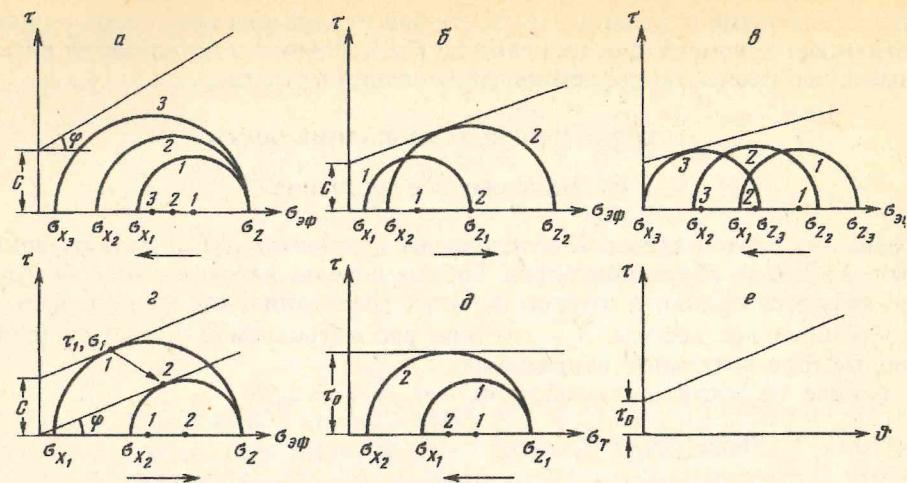


Рис. 1. Графики $\tau = f(\sigma)$ и круги Мора при изменении напряженного состояния глин в борту карьера: а — разгрузка массива горизонтальным разуплотнением; б — рост эффективной нагрузки при снижении напоров; в — снижение эффективной нагрузки при росте порового давления; г — разрушение при $\sigma_{\text{эфф}} > 0$; д — разрушение при $\sigma_{\text{эфф}} = 0$ (разжжение); е — течение вязкой жидкости

1.2. Деформации

Рассмотрена схема развития деформаций борта, когда вертикальный уступ высотой h_0 пройден в слое глин от поверхности до горизонтального слабого контакта с характеристиками прочности φ_k и c_k , меньшими прочностных характеристик слоя глин φ и c . В этом случае можно считать, что деформации прибортового массива будут заключаться в скольжении по горизонтальной плоскости с растяжением. Потенциальная поверхность отрыва удалена от бровки уступа на расстояние L_0 , определяемое равенством сил бокового распора и трения и сцепления по контакту ([5], рис. 2):

$$\zeta \gamma (h_0)^2 / 2 = c_k L_0 + \gamma' h_0 L_0 \operatorname{tg} \varphi_k; \quad (2)$$

$$L_0 = \zeta \gamma (h_0)^2 / 2 (c_k + \gamma' h_0 \operatorname{tg} \varphi_k). \quad (3)$$

Горизонтальное смещение точек поверхности прибортовой зоны $dL_0(x)$ равно

$$dL_0(x) = \zeta \gamma h_0 (L_0 - x)^2 / 4EL_0, \quad (4)$$

где x отсчитывается от борта, E — модуль упругости глин.

Максимум смещения при $x = 0$ составит

$$dL_{0\max} = \zeta \gamma h_0 L_0 / 4E. \quad (5)$$

В зоне, ограниченной размерами $0 < x < L_1$, смещения превосходят предел прочности; размер зоны деформации L'_0 с учетом потери сцепления на прибортовом участке равен

$$L'_0 = [\zeta \gamma (h_0)^2 / 2 + c_k L_1] / (\gamma' h_0 \operatorname{tg} \varphi_k + c_k). \quad (6)$$

Величина смещения на прибортовом участке равна

$$dL'_0(x) = \zeta \gamma h_0 [(L_1 - x)^2 / L_1 + L'_0 - L_1] / 4E, \quad (7)$$

а в зоне, удаленной от борта ($L_1 < x < L'_0$),

$$dL'_0 = \zeta \gamma h_0 (L'_0 - x)^2 / 4E (L'_0 - L_1). \quad (8)$$

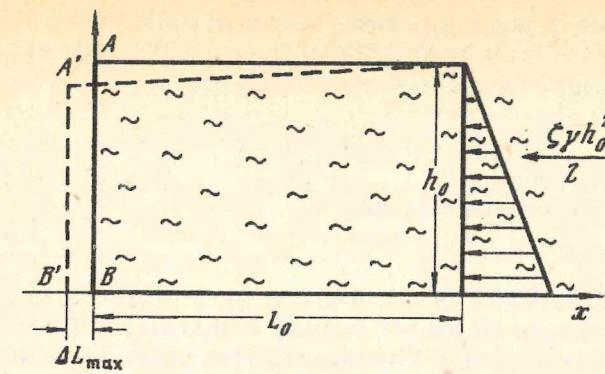


Рис. 2. Схема деформирования уступа высотой h_0 при горизонтальном разуплотнении (L_0 — длина зоны влияния разуплотнения, пунктир — положение после деформации, ΔL_{\max} — смещение уступа)

При малом сцеплении на всей площади контакта, т. е. при $c_k = 0$,

$$L'_0 = \zeta h_0 \gamma / 2 \gamma' \operatorname{tg} \varphi_k, \quad (9)$$

$$dL'_{0\max} = \zeta^2 \gamma^2 h_0^2 / 8 E \gamma' \operatorname{tg} \varphi_k. \quad (10)$$

1.3. Формирование слабого контакта

Приведенные выше зависимости, описывающие деформации слоя глин, ослабленного в основании уступа, могут быть использованы и для случая однородного массива глин, если слабый контакт сформируется в процессе смещения разуплотняющейся пачки глин, вскрытых уступом, по подстилающей толще. Протяженность зоны слабого контакта в этом случае равна

$$L_0 = \zeta \gamma h_0^2 / 2 (c + \gamma' h \operatorname{tg} \varphi). \quad (11)$$

Если уступ оформлен под углом наклона α , то

$$L_0 = (\zeta \gamma h_0^2 / 2 - ch_0 / \operatorname{tg} \alpha - \gamma' h_0^2 \operatorname{tg} \varphi / 2 \operatorname{tg} \alpha) / (c + \gamma' h_0 \operatorname{tg} \varphi) \quad (12)$$

при условии, что $h_0 > (2c + \gamma' h_0 \operatorname{tg} \varphi) / \zeta \gamma \operatorname{tg} \varphi$.

Сопровождающее процесс горизонтального разуплотнения глин увеличение пористости создает условия для подтока поровой воды из подстилающих слоев в зону контакта с разуплотненным слоем, что приводит к увеличению влажности и дальнейшему ослаблению прочности глин в зоне контакта. Благодаря набуханию глин в этой зоне происходит продвижение границы техногенного влияния выработки в глубь массива, однородного в естественном залегании.

1.4. Хрупкое разрушение массива глин

Если массив глин, вскрытый выработкой вдоль оси y и находившийся в равновесии в плоском напряженном состоянии, вскрывается горными работами в направлении оси x , то по мере продвижения поперечной траншеи, формирующей зону влияния $0 < y < L_0$, происходит сдвигение массива в направлении оси y , и на фронте продвигающейся выработки возникает перерезывающая сила, действующая в вертикальной плоскости и стремящаяся отчленить вскрытый горными выработками участок от прибортового массива. Эта сила Q_y равна

$$Q_y = \zeta_y \gamma h_0 b, \quad (13)$$

Таблица 1

где b — длина борта по оси x , и в случае потери прочности на слабом горизонтальном контакте ($c_k = \varphi_k = 0$) на вертикальной граничной плоскости действуют касательные напряжения τ_{zy} , равные

$$\tau_{zy} = Q_y/l, \quad (14)$$

где l — длина борта по оси y .

В случае предельного равновесия

$$\tau_{zy} = c + \gamma' h_0 \operatorname{tg} \varphi \quad (15)$$

прямоугольная область ($0 < y < l$, $0 < x < b$), отрезаемая двумя выработками, перейдет в напряженное состояние, близкое к состоянию одноосного сжатия. При одноосном сжатии разрушение происходит путем среза по косым сечениям, если

$$[\sigma] = 2c \operatorname{tg}(\pi/4 + \varphi/2), \quad (16)$$

или путем отрыва по вертикальным сечениям, если

$$[\sigma] = c/\zeta. \quad (17)$$

В момент разрушения массива глин происходит перестройка напряженного состояния — из состояния одноосного сжатия связной среды, характеризуемой нулевым внешним боковым распором, в состояние сжатой несвязной среды с высоким значением коэффициента бокового распора ζ_r :

$$\zeta_r = \operatorname{tg}^2(\pi/2 - \varphi/2). \quad (18)$$

Составляющая тензора напряжений $\sigma_x = \zeta_r \sigma_z$ не уравновешена прочностью массива и является активной сдвигающей силой. Релаксация напряжений в разрушенном массиве происходит в принципе по тем же законам, что и в период накопления упругих деформаций на стадии разуплотнения, но при существенно возросшем модуле деформации, определяемом не небольшой сжимаемостью глины в образце, а сжимаемостью обломочного массива глин, вследствие чего амплитуда смещений значительно выше, чем на подготовительной стадии.

2. АНАЛИЗ ОПОЛЗНЯ БОРТА КАРЬЕРА № 3

2.1. Фактические сведения

Месторождение Меловое [8, 9] разрабатывается карьером № 3 с применением бестранспортной вскрыши на верхнем передовом уступе высотой 10—17 м и на нижнем основном вскрышном уступе высотой 30 м; промежуточные уступы высотой 12,5 м отрабатываются на автотранспорт. Рудный пласт мощностью около 1 м перекрыт мощной (до 80 м) толщей палеогеновых глин, неогеновыми глинами (до 50 м), четвертичными песками (до 30 м) и подстилается глинами палеогена (200—300 м) и меловыми песчаниками. Палеогеновые глины плотные ($\gamma = 19 \text{ кН}/\text{м}^3$; $W = 0,33$; $n = 0,47$), имеют сцепление 150—260 $\text{kN}/\text{м}^2$, угол трения 14°. Водоносны четвертичные пески и меловые песчаники; напор в последних до 100 м выше поверхности.

Карьер № 3 развивает работы в северо-западном направлении фронтом шириной 2—3 км, годовое подвигание достигало 200 м/год. Рабочий борт высотой 110 м заоткошен под углом 10°, нерабочие боковые борта — под углом 16°.

В декабре 1989 г. при сокращении протяженности рабочего борта на его северном участке, поставленном за 6 мес. до этого в нерабочее положение, произошел оползень. Участок борта длиной 950 м, высотой 110 м и со средним углом наклона 22° разрушился в течение нескольких минут, причем призма упора сдвинулась на 150 м, а верхняя площадка просела на 60 м [2]. Исследование причин оползня началось со съемки поверхности, а после засыпки зоны провала продолжалось путем бурения скважин. Анализируя полученные данные (табл. 1, рис. 3),

Оползневые деформации по профилю максимальных смещений

| Зона | Блок, № | Параметры блоков, м: | | | | Горизонтальное смещение, м | Деформация: | | | |
|--------------|-----------------------|----------------------|--------|----------------|--------|----------------------------|--------------|----------------|----------|--|
| | | до оползня: | | после оползня: | | | вертикальная | горизонтальная | объемная | |
| | | высота | ширина | высота | ширина | | | | | |
| Призма упора | Передовые уступы, № 1 | 55 | 160 | 55 | 160 | 150 | 0 | 0 | 0 | |
| | Верхние уступы, № 2 | 100 | 120 | 65 | 180 | 120 | 0,35 | 0,5 | 0,02 | |
| | Оседания, № 3 | 105 | 90 | 85 | 125 | 60 | 0,27 | 0,39 | 0,01 | |
| | Оседания, № 4 | 105 | 50 | 100 | 65 | 25 | 0,05 | 0,3 | 0,2 | |
| | Оседания, № 5 | 105 | 40 | 102 | 50 | 10 | 0,03 | 0,2 | 0,16 | |
| Всего | | — | — | 460 | — | 580 | — | — | 0,17 | |

можно увидеть, что четыре нижних уступа сместились поступательно, с сохранением первоначальной формы поверхности, а верхние уступы и участок прибортового массива, сместившиеся следом за передовыми уступами, разрушились, просели и испытали существенное растяжение.

Поскольку в толще глин нет маркирующих слоев, привязка разреза проведена к пикам влажности. Документация керна скважин и визуальные наблюдения на уступах карьера не выявили литологической обусловленности пиков влажности, поэтому принято, что зоны аномалий влажности соответствуют отметкам подошвы рабочих горизонтов борта. По данным бурения скважин (рис. 4) в приграничной с оползнем зоне и в блоках оседания № 4 и 5 (табл. 1), пики, т. е. соседствующие минимумы и максимумы влажности прослежены на глубинах с отметками: максимумы — +8, +14, +25, +38 м (горизонт +40 м), +58 м (горизонт +55 м), +63 м (горизонт +65 м); минимумы — +4, +18, +60, +70 м. В блоке № 1 слои с аномальной влажностью погружаются, а в блоке № 2 фиксируется только один минимум влажности (+18 м). Таким образом, можно констатировать, что полностью разрушенным оказался только граничный с призмой упора блок верхних уступов, а следующие за ним блоки деформировались более плавно.

Величины смещений изменились не только при прослеживании вкрест простирации борта, но и в зависимости от положения сечения относительно северного и южного торцов оползневого участка, как это видно из табл. 2.

2.2. Дополнительные инженерно-геологические исследования

Начиная с 1988 г. на бортах карьера № 3 проведено бурение скважин с определением влажности и прочностных свойств глин, измерение смещений поверхности и подвижек массива по контактам, замеры порового давления.

Наиболее важным фактом, установленным по результатам анализа профилей влажности, было подтверждение механизма формирования слабых контактов за счет сдвижения массива силами бокового распора. Как видно на рис. 5, почти строго на уровнях плоскостей берм всех уступов в глубь массива прослеживаются

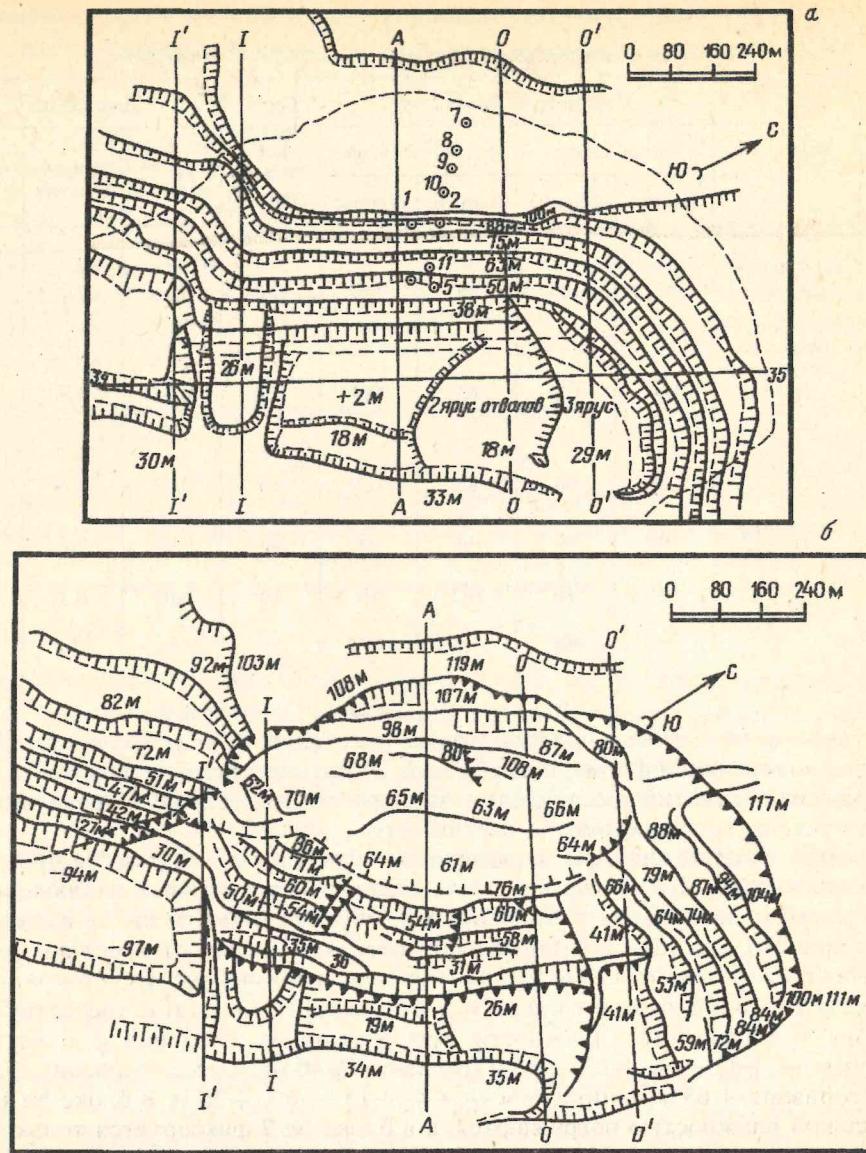


Рис. 3. Планы горных работ Северного участка западного борта: а — до оползня (15.12.87 г.), б — после оползня (7.1.88 г.)

участки аномальной (по отношению к фоновым значениям) влажности; как правило, аномалия фиксируется на небольшом интервале глубин в виде максимума и соседствующих с ним зон минимумов влажности. Плоскость смещения пачки глин по кровле нижележащей толщи является поверхностью раздела, при переходе через которую происходит скачок горизонтальных напряжений, равный $\zeta \gamma h_e / 2$ (h_e — высота уступа).

Если принять, что коэффициент трения по контактам не зависит от глубины, и допустить, что скв. 45 (рис. 5) расположена на границе зоны скольжения верхнего слоя, то можно оценить размеры зон скольжения L_i остальных слоев (табл. 3).

Расчет проведен по приближенной формуле, полученной из (9) при значениях $\zeta = 1$, $C_k = 0$, $\operatorname{tg} \varphi_k = 0.05$.

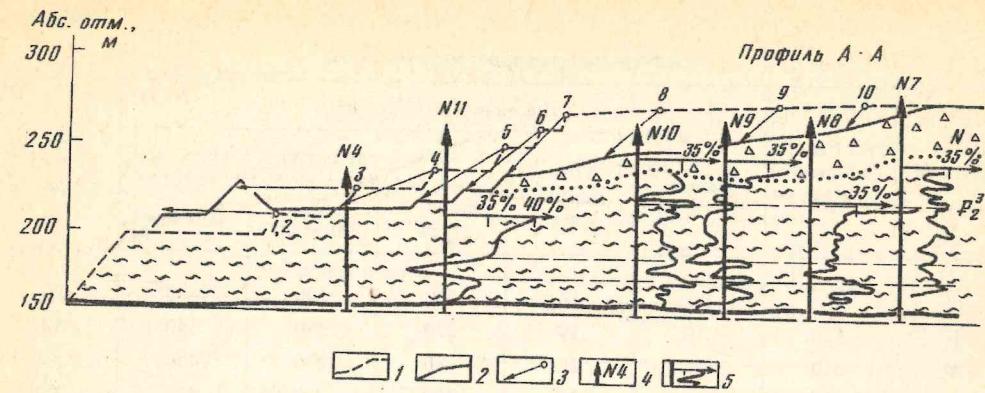


Рис. 4. Разрез АА по центру оползня: 1 — контур борта до оползня, 2 — после оползня; 3 — вектор смещений; 4 — скважины и ее номера; 5 — графики изменения весовой влажности (значение $W = 30\%$ совмещено с осью скважин)

По наблюдениям за напорами воды в глинах с помощью датчиков порового давления (рис. 5) была зафиксирована стабилизация уровней в скв. 45 и 63, удаленных от горных работ, снижение уровня при подходе передового уступа к скв. 44 (5 м/год), быстрое снижение уровней в скв. 62 перед сработкой ее роторным экскаватором (на 14—24 м за 2,5 мес.) (табл. 4).

В скважинах 41, 43—45 были отобраны образцы на влажность и получен эффект увеличения влажности от скв. 45, удаленной от борта на 500—700 м, к скв. 43, пробуренной на первом сверху уступе. Графики влажности $W(x, t)$ обработаны методом типовой кривой по формуле

$$dW = dW_0 \operatorname{erfc}(x^2/4at), \quad (19)$$

где x — расстояние от скв. 45, dW_0 — максимальное понижение влажности, a — пьезопроводность. По графикам $W(x)$ в скв. 44 и 43 (влажность в скв. 45 условно принята за исходную, где эффект набухания глин не сказывается) получены значения $a = 1 \text{ м}^2/\text{сут}$ (скв. 44) и $a = 0.44 \text{ м}^2/\text{сут}$ (скв. 43); для этих же скважин соответственно $dW_0 = 0.055$ и $dW_0 = 0.09$. Принимая величину водоотдачи $\mu = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ (скв. 44) и $\mu = 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ (скв. 43), получим постоянное значение коэффициента фильтрации $k_0 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{сут}$, а $S_0 = 110 \text{ м}$ и 90 м (соответственно для 44 и 43 скв.). Имея в виду, что $S_0 = dW/\mu$ — приведенное снижение величины порового давления под влиянием горизонтального разуплотнения, по формуле [6]

$$k_0 = 22n_0/h_k^2, \quad (20)$$

где $h_k = p_k/\gamma_0$, h_k — высота капиллярного поднятия, p_k — капиллярный потенциал, γ_0 — объемный вес воды, получим значение активной пористости $n_0 = 0.25$.

Как видно из графиков влажности (рис. 5), на горизонтах берм возникает перепад значений влажности, связанный со скачком величины горизонтальных расстяжений. Этот скачок деформаций, оцениваемый величиной $\varepsilon = \zeta \gamma h_i/E$, где h_i — глубина i -го контакта, возникает при зарождении плоскости ослабления и существует в дальнейшем постелью, поскольку происходит движение борта карьера, вызывающее соответствующее перемещение массива навстречу борту. При этом деформировании в слое выше плоскости скольжения возникает потенциал всасывания p_k , эквивалентный скачку деформаций:

$$p_k = \gamma_0 h_k = \beta \varepsilon E = \beta \zeta \gamma h_i, \quad (21)$$

где β — коэффициент передачи нагрузки на поровую воду.

Таблица 2

Деформации по простирианию борта

| Профиль | Расстояние от южной границы, м | Размеры до оползня | | | | Смещение блока упора, м | |
|---------|--------------------------------|--------------------|-------------------|-----------|-----|-------------------------|-----|
| | | высота борта, м | угол борта, град. | ширина, м | | | |
| | | блока упора | блока давления | оползня | | | |
| I' | 0 | 90 | 17 | 150 | 300 | 450 | 20 |
| I | 120 | 110 | 19 | 220 | 320 | 540 | 50 |
| A | 320 | 105 | 20 | 180 | 270 | 450 | 90 |
| 0 | 620 | 110 | 25 | 200 | 210 | 410 | 120 |
| 0' | 780 | 120 | 18 | 200 | 380 | 580 | 20 |

Таблица 3

Рассчитанные значения L_i

| № п/п | Глубина, м | Расстояние до границы зон разуплотнения, м | | |
|-------|------------|--|-------------------|------------|
| | | от забоя уступа | от бровки карьера | от скв. 45 |
| 1 | 25 | 500 | 500 | 0 |
| 2 | 37 | 1100 | 750 | 250 |
| 3 | 47 | 1300 | 900 | 400 |
| 4 | 60 | 1700 | 1200 | 700 |
| 5 | 85 | 2000 | 1700 | 1200 |

В зоне слоя ниже плоскости скольжения, контактирующей с разуплотняющимся верхним слоем, за счет перепада давлений возникает отток воды наверх и соответствующая фильтрационная консолидация, которая фиксируется по минимуму влажности рядом с максимумом влажности в зоне касательных деформаций. Процесс перекачки воды в зону набухания совершается с приблизительно постоянным граничным условием $S_{0i} = h_k$. Поскольку на процесс перераспределения влажности в толще глин накладывается подсос влаги из постоянного источника, которым является четвертичный водоносный горизонт, то профиль влажности по мере приближения к борту теряет остроту пиков влажности, а средняя влажность всей толщи растет.

При выходе толщи глин из-под нагрузки в бортовой зоне происходит их вертикальная разгрузка и разуплотнение [7], однако вследствие отсутствия источника постоянного питания подземных вод быстрого набухания не происходит.

2.3. Анализ оползня 1987 г.

Северный участок борта был оформлен в июле 1987 г. с устойчивыми параметрами: средняя высота 105 м, протяженность по верху 1300 м, угол наклона 20—22°. В период с июля по декабрь 1987 г. горные работы продолжались на южном участке рабочего борта; за это время юго-западный торец стационарного участка борта был отрезан по верхнему уступу на 350 м, по среднему (гор. +50 м) — на 150 м, по рудному горизонту +4 м — на 120 м (рис. 6). Вдоль остановленного участка был уложен автодорога: ярусом высотой 14 м — повсеместно, ярусом 22 м — на длине 160 м поперек южной границы и ярусом 31 м — контрфорсом шириной

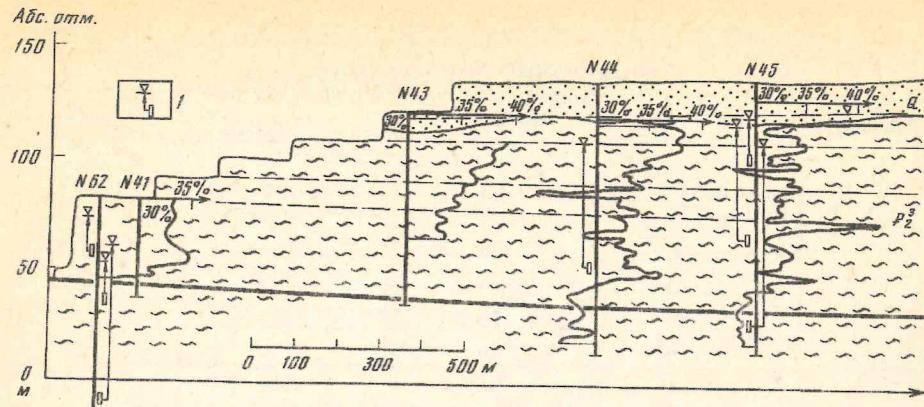


Рис. 5. Разрез по центру западного рабочего борта карьера № 3 ПГМК: 1 — уровень воды и величина давления (длина стрелки) в точках замера порового давления; остальные обозначения см. рис. 4

110 м у южной границы участка (рис. 3, а). Ночью 16.12.87 г. в течение 5 мин в выработанное пространство сместились передовые уступы (от +4 до +80 м), затем так же быстро — горизонт +100 м и прибортовая площадь выше горизонта +100 м, после чего сполз сбоку на юг северный нерабочий борт.

Оползневой участок карьера до его подрезки с юго-запада находился в устойчивом состоянии, близком, по-видимому, к предельному. За счет прошедших процессов горизонтального разуплотнения сформировалась серия слабых контактов с коэффициентом трения 0,05 и нулевым сцеплением, зона влияния разуплотнения распространилась от борта на расстояние более 2 км. Боковой распор в районе борта не превышал $0,2 \gamma h$ и был меньше сцепления глин. Величина прочности глин на сжатие

$$[\sigma] = 2c \operatorname{tg}(\pi/4 + \phi/2) = 550 \text{ кПа} \quad (22)$$

была больше среднего эффективного напряжения от веса пород σ_{cp}' :

$$\sigma_{cp}' = \left(\int_0^h \sigma' dz \right) / h = (\gamma - \gamma_0) h / 2 + \delta \gamma_0 = 520 \text{ кПа} \quad (23)$$

в пределах призмы упора (блок 1, $h = 70$ м, $\delta^1 = 20$ м).

Положение стало изменяться по мере отрезания рабочего борта карьера уступами и формирования открытого торца остановленного участка. Во-первых, снижалась жесткость защемления южного торца этого участка; во-вторых, раскрепощались силы бокового распора $\sigma_x = \zeta_x \sigma_z$, действовавшие по простирианию нерабочего участка. По границе зоны «латерального» сдвижения массива глин происходило отрезание бортовой части массива от прибортовой, как только перерезывающая сила становилась больше сил сцепления. В пользу именно такого развития процесса свидетельствует отмеченный В. С. Яворским [9] факт появления в откосах подрезаемого торца серии согласных с простирианием нерабочего борта вертикальных трещин (отнесенных им, правда, к проявлению тектоники).

Подготовка разрушения борта завершилась деформацией разворота южного конца блока упора, отчлененного трещинами от борта, и блока верхних уступов с переводом пород зоны верхних уступов в состояние одноосного сжатия. Лишенный бокового распора массив глин зоны активного давления начал раздавливаться под собственным весом, поскольку среднее эффективное давление σ_{cp}' при высоте более 80—100 м превзошло прочность массива на сжатие. Вначале полностью подрезанный с торца блок 2, а затем и частично подрезанные блоки цикл за-

¹ δ — уровень подземных вод.

Таблица 4

Замеры порового давления в глинах

| Номер скважины | Дата замера | Глубина, м | Давление | Уровень, м |
|----------------|-------------|------------|----------|------------|
| 62 | 26.8.91 | 110 | 68,8 | 41,2 |
| | 5.11.91 | 110 | 54,6 | 55,4 |
| | 26.8.91 | 40 | 22 | 18 |
| | 5.11.91 | 40 | -0,8 | 40,8 |
| | 26.8.91 | 20 | 22 | 3 |
| 44 | 5.11.91 | 20 | -2 | 27 |
| | 30.9.90 | 86 | 72 | 14 |
| | 12.12.90 | 86 | 65,8 | 20,2 |
| 45 | 28.12.91 | 86 | 60,7 | 25,3 |
| | 26.8.91 | 105 | 78,2 | 26,8 |
| | 28.12.91 | 105 | 78,2 | 26,8 |
| | 26.8.91 | 70 | 53,5 | 17,5 |
| | 28.12.91 | 70 | 53,6 | 17,4 |
| | 26.8.91 | 35 | 18 | 17 |
| | 28.12.91 | 35 | 19,1 | 15,9 |
| 63 | 26.8.91 | 120 | 95 | 25 |
| | 28.12.91 | 120 | 94 | 26 |
| | 26.8.91 | 80 | 54,9 | 25,1 |
| | 28.12.91 | 80 | 54,5 | 25,5 |

циклом перешли в состояние рыхлой обломочной массы, лишенной сцепления, с высокой сжимаемостью и высоким боковым распором ($\zeta_r = 0,6$, если $\varphi = 15^\circ$ (18)).

Учитывая, что перед разрушением боковое давление в призме активного давления не превышало 0,1—0,2 от весовой нагрузки, давление сил бокового распора на блок упора после разрушения блока 2 составило 0,4—0,5 от веса пород, что и вызвало смещение призмы упора в выработанное пространство, имевшее характер горного удара.

Отмеченная в табл. 1 дискретность деформаций массива, выражавшаяся в наличии террас, нарушивших монотонный характер рельефа после обрушения, соответствует дискретному убыванию подрезки торца деформированного участка в глубь массива (рис. 3, 6). Блок 2 был подрезан от гор. +50 м до гор. +75 м, блок 3 подрезан только выше гор. +75 м, блок 4 — выше гор. +88 м. Соответственно при высоте блока 2 над плоскостью скольжения (гор. +15 м) равной 85 м, зона мощностью 35 м сверху была ослаблена подрезкой; в пределах блока 3 высотой 90 м ослаблено 30 м; в блоке 4 высотой 100 м ослаблено 25 м; в блоке 5 высотой 100 м ослаблено 25 м.

Обратным расчетом, считая для простоты, что каждый блок испытал растяжение под действием избыточного бокового распора, равного $0,3 \gamma (h_i - h_{i-1})$, где i — номер рассматриваемого блока, получим значения модуля упругости разрушенного массива глин: $E_2 = 140$ кПа, $E_3 = 180$ кПа, $E_4 = 240$ кПа, $E_5 = 60$ кПа.

Расчет проведен по формуле

$$E = d\sigma_x L_i / 2dL, \quad (24)$$

где $d\sigma_x$ — избыточный боковой распор, L — ширина, dL — увеличение ширины рассматриваемого блока после разрушения борта.

Динамический характер обрушения борта связан с появлением после хрупкого

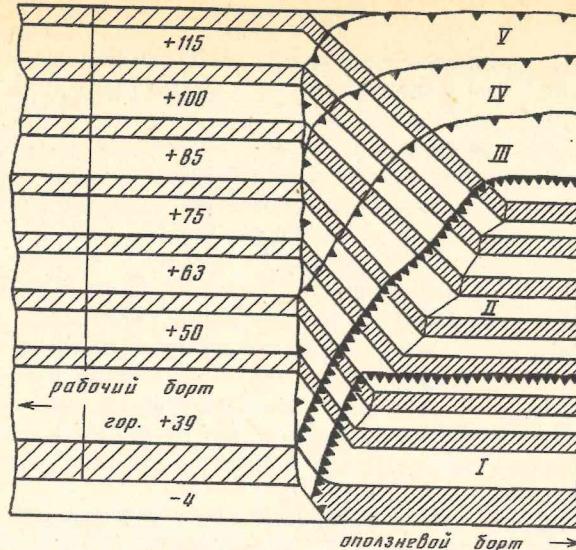


Рис. 6. Схема подрезки северного участка

разрушения глин блока 2 избыточной силы бокового распора с погонной интенсивностью $F_{изб}$ порядка 20 Мн/м:

$$F_{изб} = \zeta_{изб} \gamma h^2 / 2 \quad (25)$$

($\zeta_{изб} = 0,4$; $h = 70$ м). Эта сила, действуя на блок упора 1 (его погонная масса равна 650 т/м), сместила его на расстояние 150 м с ускорением $0,3g = 3$ м/с², что следует из расчета по формуле 2-го закона Ньютона за время $t = (2dL/a)^{1/2} = 10$ с.

Блок 2, сместившийся на 120 м (погонная масса 3000 т/м) под действием силы 65 Мн/м при $a = 2,25$ м/с², находился в движении 11 с; блок 3 (смещение 60 м, погонная масса 5000 т/м) перемещался под действием силы около 65 Мн/м в течение 9,5 с; блок 4 (25 м, 6000 т/м, 65 Мн/м) передвинулся на 25 м за 7 с; блок 5 (10 м, 7000 т/м, 65 Мн/м) — за 5 с. Если принять, что движение блоков происходило синхронно, то блоки 4 и 5 смещались под действием меньших сил, соответственно равных 32 и 16 Мн/м.

Приведенные расчеты относятся к центральному створу, где мало сказываются тормозящие реактивные силы, возникающие в краевых сечениях, вблизи которых борт испытывал меньшие смещения: на юге — из-за контрфорса, на севере — из-за жесткого защемления по всей ширине борта. Расчет изгибных деформаций оползняющего участка проведен по формулам изгиба балки с защемленными концами [4]. Максимальное смещение dy_{max} каждого из рассматриваемых блоков описывается формулой

$$dy_{max} = ql^4 / 384EI \quad (26)$$

со следующими параметрами (табл. 5).

В отличие от расчета перемещений под действием импульса сил, сообщавшего ускорение смещаемой массе горных пород, при расчете изгибных смещений оползняющих блоков учитывается не весь путь, а только та его часть (графа dy_{max} в табл. 5), которая обусловлена торможением данного блока за счет заделки его концов, т. е. разница между смещениями данного блока и следующего за ним блока, поскольку непосредственно изгибом данной балки вызывается не полное ее смещение, а только указанная разность смещений.

Сопоставление фактических и расчетных смещений dy по фронту оползня приведено в табл. 6.

Довольно заметная асимметрия фактической функции смещений связана с

Таблица 5

Параметры оползневых блоков ($E_{sp} = 1$ МПа)

| Блок | Высота, м | Ширина, м | I, m^4 | dy_{max}, m | Расчетная величина | |
|------|-----------|-----------|----------------|---------------|--------------------|----------|
| | | | | | нагрузка $q, Mh/m$ | длина, м |
| 1 | 55 | 160 | $2 \cdot 10^7$ | 30 | 20 | 600 |
| 2 | 100 | 120 | $2 \cdot 10^8$ | 60 | 65 | 500 |
| 3 | 105 | 90 | $3 \cdot 10^8$ | 35 | 65 | 500 |
| 4 | 105 | 50 | $9 \cdot 10^8$ | 15 | 32 | 650 |
| 5 | 105 | 40 | $2 \cdot 10^9$ | 10 | 16 | 1000 |

Таблица 6

Сопоставление фактических и расчетных смещений

| Расстояние (x) от южного края, м | $x_n = x/l$ | Относительное смещение dy/dy_{max} | |
|--------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|
| | | расчетное | фактическое |
| 120 | 0,15 | 0,24 | 0,23 |
| 320 | 0,4 | 0,92 | 0,54 |
| 620 | 0,78 | 0,49 | 0,77 |
| 780 | 0,95 | 0 | 0 |

тем, что южный край оползшего борта был защемлен менее жестко, чем северный. Наличие отвала у южного торца оползня сыграло роль амортизатора; на первых порах левый (южный) конец смешался как свободный конец консольной балки (смещение блока упора здесь составляло 20 м), а затем, упервшись в навалы, поворачивался наподобие шарнира, в то время как правый конец изгибавшейся балки представлял собою плавное сочленение с нерабочим северным бортом и выдержал перегрузку, возникшую в момент обрушения основного участка, т. е. сыграл роль жесткой заделки.

Спустя час после завершения оползня основного участка западного борта обрушились верхние уступы северного нерабочего борта. Деформации нерабочего борта, протяженность обнаженной поверхности которого невелика, являются своего рода ЧП и явно были обусловлены обрушением западного участка.

Северный борт — сопряжение оползшего массива с необрушенным целиковым массивом — испытал избыточное горизонтальное давление в направлении, параллельном вектору смещения оползня, равное примерно половине величины перерезывающей силы, действовавшей на массив оползня, т. е. около 8000 Мн. Если принять, что эта сила была равномерно распределена по площади сечения восточного борта ($S = 12 \cdot 10^3 m^2$), то создаваемое ею давление, равное 650 кН/м², оказалось достаточным для того, чтобы срезать борт по вертикальной плоскости высотой 100 м со сцеплением 200 кН/м² на протяжении 400 м и создать на участке сопряжения западного и северного бортов условия перехода глин в напряженное состояние с высоким значением бокового распора, что и привело к смещению этого участка борта в выработанное пространство.

Заключение

На нестандартный характер оползней по слабым контактам глинистых пород указывали, кроме Э. Л. Галустьяна, многие авторитетные геотехники, среди них наш профессор Н. Н. Маслов, А. Скемpton, норвежские, шведские и канадские исследователи. Н. Н. Маслов еще в 40-х годах писал, что оползни по круглоцилиндрической поверхности чрезвычайно редки в природе и предлагал метод горизонтальных сил для корректировки существующих расчетных схем. А. Скемpton, анализируя оползень борта котлована в Йоркшире, пройденного в лондонских плотных глинах, связывал частичную потерю глинами сцепления и трения с быстрым их разуплотнением. Описания оползней в английских и канадских журналах, исследования в Норвегии и Швеции в 50-х годах и в Канаде в 80-х вплотную подводили к мысли о глобальной роли бокового распора в формировании слабых контактов в основании глинистых толщ. Описанный в нашей статье оползень, грандиозный по масштабам (объем 3—5 млн. м³) и по характеру разрушения массива глин, послужил научным полигоном для накопления информации о поведении глин в условиях интенсивного техногенного воздействия.

Не претендуя на исчерпывающий геомеханический анализ этой интереснейшей проблемы, автор попытался коснуться узловых моментов (движение, набухание, разрушение) с тем, чтобы создать логически связную картину, акцентировав внимание на ведущих факторах, определяющих возможности управления процессами деформаций массива глин. Анализ данных, собранных в период работ ВНИМИ на карьере № 3, показал, что гипотеза автора о формировании техногенных слабых контактов не только объясняет причины обрушения борта в 1987 г., но и позволяет прогнозировать поведение массива при дальнейшей отработке месторождения при условии квалифицированного гидрогеомеханического контроля.

Автор благодарит Э. Л. Галустяна, В. С. Яворского и И. П. Зелинского, способствовавших работе над материалом статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галустян Э. Л. Глина-образец и массив // Изв. вузов. Геология и разведка. 1990. № 10. С. 122—126.
- Галустян Э. Л. Деформации откосов на карьере № 3 и способы их предупреждения // Горн. журн. 1990. № 11. С. 19—22.
- Галустян Э. Л. Устойчивость бортов разрезов при разработке горизонтальных и пологих залежей // Уголь. 1989. № 9. С. 35—37.
- Кинасашвили Р. С. Сопротивление материалов. М.: Наука 1975. 374 с.
- Рюмин А. Н. Расчет деформаций бортов карьеров и естественных склонов, сложенных слоистыми породами // Инж. геология. 1992. № 1. С. 97—115.
- Рюмин А. Н. Рекомендации по методике определения гидрогеологических условий. Дис. ... уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Л.: 1975. 27 с.
- Рюмин А. Н., Лазарев И. А. Исследование роли напоров подземных вод в формировании оползня на Ангренском разрезе (в порядке обсуждения) // Тр. ВНИМИ. Л.: ВНИМИ. 1990. С. 126—139.
- Юпатов В. Е., Букurov A. A., Литвиненко А. С. Основные черты геологического строения месторождения // Горн. журн. 1990. № 11. С. 14—15.
- Яворский В. С., Литвиненко А. С., Сухонос В. С. Опыт работы геомеханической службы // Горн. журн. 1990. № 11. С. 16—18.

ВНИМИ

Поступила в редакцию
19.IV.1993

УДК 624.131

© 1995 г. Н. О. КОЖЕВНИКОВ, С. П. НИКИФОРОВ, С. В. СНОПКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Выполнен анализ возможностей использования ориентационной поляризации содержащегося в мерзлых горных породах льда для решения задач геокриологии. При проведении съемок МПП и РСВП наряду с ориентационной выявлено существование относительно более медленной поляризации. Несмотря на то, что природа этой поляризации пока не установлена, можно утверждать, что реагирующий на нее метод РСВП является превосходным инструментом для картирования мерзлых пород.

Как известно, освоение территорий, для которых характерно развитие сезонной и особенно многолетней мерзлоты, сопряжено с необходимостью использовать в качестве оснований для промышленных и гражданских сооружений мерзлые грунты, содержащие значительное количество льда. Поведение льдистых грунтов под статическими нагрузками во многом определяется способностью льда к пластическим деформациям. В связи с этим прогноз надежности фундаментов и оснований сооружений в районах развития сезонной и многолетней мерзлоты зависит от точности количественной оценки показателей льдистых грунтов: объемного содержания льда, его температуры и характера распределения в пределах верхней части геологического разреза (ВЧР).

В большинстве случаев представление о криогенной текстуре грунта и ее количественных характеристиках получают при описании керна скважин или стенок шурфов. Для изучения температурного режима ВЧР необходимо осуществлять термометрические измерения в скважинах. К сожалению, указанные операции являются весьма трудоемкими. Определение количественных показателей льдистости базируется на визуальном способе описания керна и поэтому неизбежно включает некоторую долю субъективизма. Кроме того, определяемые в процессе инженерно-геологического опробования параметры грунтов относятся к объемам, измеряемым кубическими дециметрами, реже метрами, в то время как для надежного геокриологического прогноза необходимо располагать интегральными инженерно-геологическими характеристиками гораздо больших объемов ВЧР. В литературе последняя из перечисленных проблем известна как «влияние масштабного фактора» [10].

Решение этих проблем может быть значительно облегчено за счет привлечения геофизических методов, среди которых ведущая роль при изучении находящейся в мерзлом состоянии ВЧР принадлежит электрометрическим исследованиям. При этом основным (и практически единственным) измеряемым параметром является удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород. В случае, если последние содержат воду, их УЭС в мерзлом и талом состояниях существенно различаются, что и является благоприятной предпосылкой для использования электрометрии при решении задач геокриологии. К сожалению, несмотря на несомненные достоинства электроразведки на постоянном и низко-

частотном переменном токах (высокая технологичность, возможность картирования и мониторинга мерзлых пород в плане и разрезе и др.), ее геологическая информативность в ряде случаев, особенно при оценке температуры и льдистости криогенных образований, оставляет желать лучшего. Это связано с тем, что мерзлые горные породы представляют собой многофазную и многокомпонентную систему, характерной особенностью которой является наличие льда и незамерзшей воды. Количество незамерзшей воды определяется ее минерализацией, а также удельной поверхностью, температурой и влажностью грунта. Наиболее существенные изменения фазового состава воды и как следствие УЭС грунтов происходят в интервале температур от 0 до -7°C (для крупнодисперсных рыхлых грунтов нижняя граница этого интервала составляет -2°C). Количественные соотношения и распределения границ, между которыми заключена незамерзшая вода (лед — лед, лед — минеральная частица, минеральная частица — минеральная частица и др.), различны в зависимости от исходной влажности, гранулометрического состава, скорости промерзания и т. д. Все это предопределяет чрезвычайно широкий диапазон УЭС мерзлых горных пород. Даже при температуре ниже -10°C в горных породах содержится некоторое количество незамерзшей воды, что способствует возникновению двойных электрических слоев на границах фаз лед — вода, минеральная частица — вода. Зачастую перечисленные факторы непредсказуемым образом влияют на УЭС мерзлых горных пород и негативно сказываются на результатах электрометрических исследований.

Электрометрии мерзлых толщ присущи и другие недостатки. Так, еще в 1947 г. было выяснено, что дифференциация пород по УЭС, вызываемая их различной водонасыщенностью, при отрицательных температурах может быть меньше, чем при положительных [2]. Это означает, что при переходе горных пород из талого в мерзлое состояние диагностические способности электроразведки на постоянном токе могут оказаться близкими к нулю. В тех случаях, когда мерзлые породы выходят на дневную поверхность или залегают в непосредственной близости к ней, слабым местом электрометрического метода разведки является необходимость осуществлять гальванические заземления.

В связи с вышесказанным едва ли вызовет возражения тезис о том, что перспективы дальнейшего развития электроразведки при изучении криогенных геологических образований связаны с исследованием и практическим использованием физических явлений, присущих непосредственно замерзшей воде. Одно из таких явлений давно известно и довольно полно исследовано в лабораторных условиях. Остается лишь удивляться, почему это явление до сих пор не нашло практического применения в электромагнитной разведке. Речь идет о порождаемой процессами ориентационной поляризации частотной дисперсии диэлектрической проницаемости льда [2, 4, 8, 11, 14]. Во всех известных нам работах по наземной и скважинной электроразведке криогенных пород это явление не учитывается и его возможности как «носителя» геокриологической информации не анализируются [1, 9, 13, 18].

Напомним, что в общем случае в веществе имеет место несколько разновидностей поляризации — электронная, атомная, ориентационная, объемная и др. Индуцированная поляризация атомов и молекул происходит за счет деформации электронных орбит. В процессе принимает участие маленькая масса, и структура является очень жесткой; свободные частоты ее колебаний чрезвычайно велики. Иначе говоря, движение электронов в атомах и молекулах характеризуется периодами порядка 10^{-16} с — это соответствует длине волны видимого света. Для атома 10^{-14} с является длительным промежутком времени. За такое время нетрудно изменить его электронную структуру. Поэтому строго неполярные вещества ведут себя практически одинаково — начиная от постоянного тока и до частот видимого света. Поляризация следует за полем, и электрическая восприимчивость не зависит от частоты.

Ориентация полярной молекулы представляет собой процесс, совершенно отличный от простой деформации электронного облака. При таком процессе

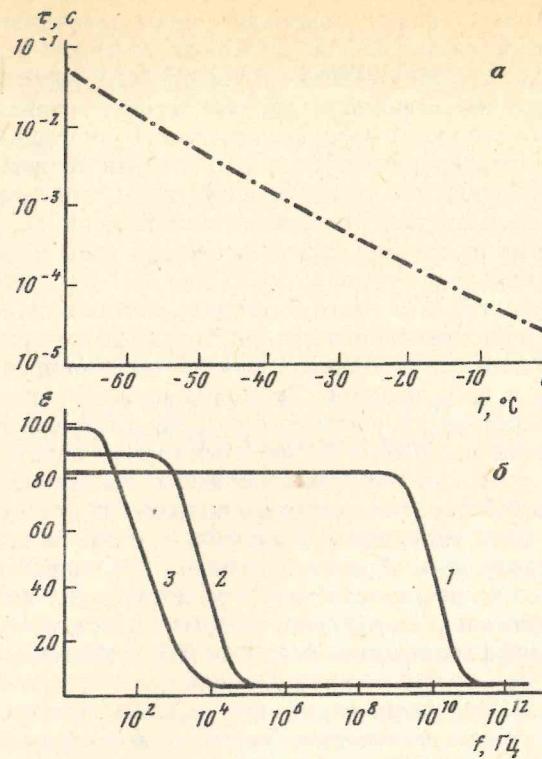


Рис. 1. а — зависимость времени релаксации чистого льда от температуры; б — изменение диэлектрической проницаемости воды и льда в зависимости от частоты колебаний электрического поля: 1 — вода, 20° С; 2 — лед, -1° С; 3 — лед, -40° С

молекула должна поворачиваться как целое. Вращение отстает от вращающего момента за счет сопротивления трения, уменьшающего также амплитуду результирующей поляризации. Масштаб времени, в котором проявляется этот эффект, далеко не одинаков для различных полярных веществ. В воде время релаксации τ для переориентации диполя составляет примерно 10^{-11} с. Диэлектрическая проницаемость ϵ остается близкой к 80 до частот порядка 10^{10} Гц. С увеличением частоты ϵ падает до небольшого значения, типичного для неполярной жидкости. В других веществах, особенно твердых, это характеристическое время может быть гораздо больше. Для пресного поликристаллического льда около точки замерзания оно близко к 10^{-5} с, а при дальнейшем понижении температуры (до -60° С) составляет $\sim 10^{-2}-10^{-1}$ с (рис. 1, а) [4]. На рис. 1, б представлены типичные экспериментальные кривые, показывающие, как изменяется диэлектрическая проницаемость воды и льда в зависимости от частоты [11].

Поляризация в полярной диэлектрике обычно пропорциональна приложенному полю и обратно пропорциональна абсолютной температуре. С ростом температуры наблюдается экспоненциальное убывание эффективного времени релаксации:

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta W/kT), \quad (1)$$

где τ_0 — константа, ΔW — энергия активации, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана.

Теория диэлектрической проницаемости в средах, содержащих полярные молекулы, разработана Дебаем. В наиболее простом случае (одно время релаксации

и экспоненциальный закон становления) основной результат теории — формула для комплексной относительной диэлектрической проницаемости [4, 14, 15]:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (2)$$

где $\epsilon_\infty = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \hat{\epsilon}$ — динамическая диэлектрическая проницаемость, т. е. значение ϵ при наивысшей частоте (практически при частоте, достаточно большой по сравнению с частотой релаксации вещества $\omega = 1/\tau$); $\epsilon_s = \lim_{\omega \rightarrow 0} \hat{\epsilon}$ — статическая диэлектрическая проницаемость, т. е. значение ϵ в квазистационарном электромагнитном поле.

Используя (2), нетрудно показать, что реальная ϵ' и мнимая ϵ'' составляющие $\hat{\epsilon}$ определяются выражениями

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (3)$$

$$\epsilon'' = \omega\tau \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) позволяют оценить частотные зависимости диэлектрических характеристик: с возрастанием частоты приложенного поля ϵ' должна уменьшаться, стремясь к определенным асимптотическим значениям при $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$. Что касается коэффициента потерь ϵ'' , то эта величина имеет максимум при частоте $\omega = 1/\tau$.

Многочисленные измерения на образцах свидетельствуют, что ориентационная поляризация имеет место не только в кристаллах льда, но и в мерзлых грунтах [2, 14]. Анализ температурных зависимостей $\tau(T)$ пресного льда и мерзлых пород — песка, каолина и суглинка — показал, что в процессе охлаждения криогенной породы и вымерзания незамерзшей воды τ монотонно возрастает [14]. В случае мерзлого песка кривая $\tau(T)$ приближается к соответствующей кривой, полученной для пресного поликристаллического льда при температуре -20° С. Это свидетельствует о том, что система «лед — незамерзшая вода» в мерзлом кварцевом песке перешла в состояние, аналогичное по протеканию релаксационных процессов состоянию пресного поликристаллического льда. Для каолина и суглинка подобное состояние достигается при значительно более низких температурах. Это связано с тем, что система «лед — незамерзшая вода» в глинистых породах отличается от пресного поликристаллического льда большей подвижностью молекул.

Общий характер температурной зависимости $\tau_r(T)$ эффективного времени релаксации для мерзлых грунтов различного минерального состава и кристаллической структуры определяется релаксационными характеристиками льда и незамерзшей воды. Если обозначить эффективное время релаксации льда τ_l , то в некотором диапазоне температур (до момента практически полного завершения фазовых периодов) отношение τ_r/τ_l характеризует влияние незамерзшей воды на суммарный релаксационный процесс. Зависимость этого отношения от температуры соответствует изменению количества незамерзшей воды в мерзлом грунте. Температуре практически полного завершения фазовых переходов воды в лед соответствует отношение τ_r/τ_l , близкое к единице. Эта температура сильно зависит от степени дисперсности породы. Так, для мерзлого кварцевого песка отношение τ_r/τ_l близко к единице уже при $T = -10^{\circ}$ С, в то время как для мерзлого суглинка эта величина при $T = -70^{\circ}$ С еще далека от единицы. Это объясняется тем, что даже при столь низкой температуре в суглинке имеется

определенное количество незамерзшей воды, которое почти не меняется с понижением температуры [14].

Необходимо отметить, что в дисперсных (особенно глинистых) породах помимо ориентационной поляризации воды может иметь место объемная поляризация за счет специфических механизмов проводимости и эффекта Максвелла — Вагнера [12, 14, 16, 17]. Подобные процессы преобладают, особенно на низких частотах, и приводят к появлению эффективной диэлектрической проницаемости, равной 10^4 — 10^8 . Характер частотной дисперсии в при влиянии механизмов проводимости существенно отличается от наблюдаемого в случае ориентационной поляризации.

Изложенная выше информация побудила авторов начать целенаправленные исследования по выяснению практических возможностей использования процессов ориентационной поляризации для изучения криогенных пород в их естественном залегании. Очевидно, при возбуждении криогенных пород ступенчатым или импульсным электрическим полем должен наблюдаться соответствующий переходный процесс. Логично предположить, что начальная амплитуда этого процесса в поляризующихся мерзлых породах должна быть пропорциональна общему количеству содержащегося в них льда, а характерное время релаксации — абсолютной величине их отрицательной температуры (см. выражение (1)). В 1991 г. одним из авторов настоящей статьи была рассчитана импульсная характеристика кольцевой модели мерзлого грунта с учетом частотной дисперсии диэлектрической проницаемости. Эта работа была инициирована необходимостью объяснить аномальные импульсные характеристики ВЧР кимберлитовых полей Якутии. Выяснилось, что индукционно вызванная ориентационная поляризация в криогенных породах должна оказывать весьма ощутимое влияние на результаты измерений методом переходных процессов. Как показало численное моделирование, это влияние заключается в существенном — вплоть до смены знака — изменении формы импульсной характеристики модели [5—7].

Летом 1992 г. авторами были проведены экспериментальные исследования, основная цель которых заключалась в ответе на вопрос: возможно ли *in situ*, т. е. в полевых условиях, практически наблюдать эффекты ориентационной поляризации в криогенных породах? При выборе полигона для проведения натурных экспериментов мы исходили из следующих соображений. Во-первых, полигон должен быть детально изучен в геокриологическом отношении. Во-вторых, необходимо, чтобы в пределах полигона находились участки, представленные идентичными грунтами и отличающиеся лишь тем, что грунты одного участка находятся в талом, а другого — в мерзлом состоянии. В-третьих, для снижения возможного влияния всех видов поляризации, за исключением ориентационной, необходимы однородные в макроскопическом отношении грунты (лучше всего пески), содержащие минимальное количество частиц глинистой фракции. Минерализация содержащейся в грунтах влаги также должна быть незначительной.

С учетом перечисленных соображений в качестве эталонного был выбран полигон, расположенный в пойме р. Муя в 4 км от п. Таксимо (Муйский р-н Республики Бурятия). В геологическом отношении полигон приурочен к Муйской впадине, выполненной мощной толщей кайнозойских аллювиальных отложений. По результатам инженерно-геологических исследований (ВСТИСИЗ, 1990 г.), проводившихся для целей сейсмического микрорайонирования, в пределах опытного полигона закартирована мощная однородная толща песков различной крупности. Минералогический состав песков однообразен: преобладают кварц (55—60%) и полевой шпат (35%).

Буровые скважины глубиной до 20 м не вышли из однородной песчаной толщи; по геофизическим данным, мощность песков составляет 100—200 м и более. Район относится к зоне распространения многолетней мерзлоты с островными таликами. Многолетняя мерзлота приурочена к заболоченным участкам низких геоморфологических уровней и залегает у дневной поверхности под маломощными таликами. Максимальная мощность многолетнемерзлых отложений превышает 200 м, средняя температура составляет 1—2° С ниже 0.

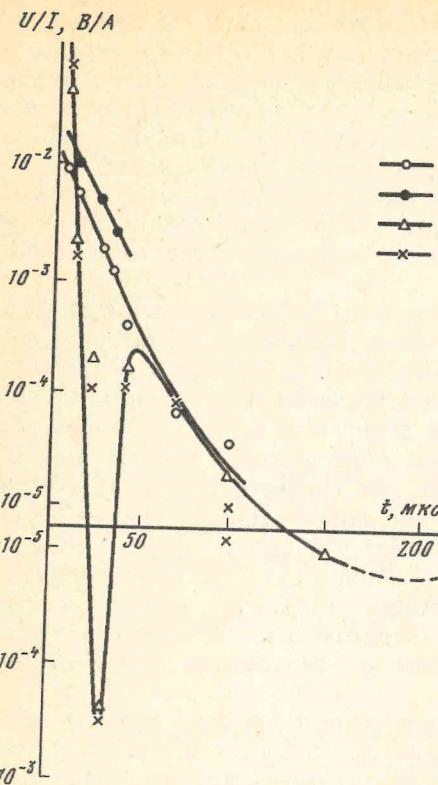


Рис. 2

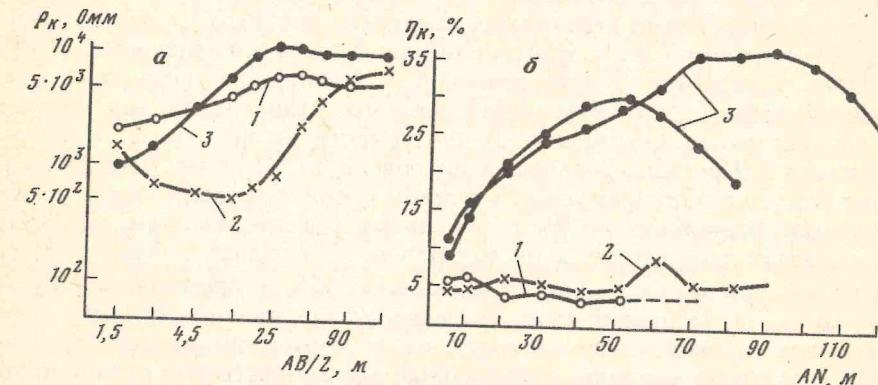


Рис. 3

Рис. 2. Переходные характеристики верхней части разреза: 1 — пески талые, маловлажные; 2 — пески талые, водонасыщенные; 3, 4 — пески мерзлые, сильнольдистые

Рис. 3. а — кривые ρ_k метода ВЭЗ; б — кривые η_k метода РСВП: 1 — пески талые, маловлажные; 2 — пески талые, водонасыщенные; 3 — пески мерзлые, сильнольдистые

менах. На рис. 2 представлены графики зависимостей приведенной к току ЭДС переходных процессов от времени, зарегистрированные над талыми и мерзлыми песками совмещенной установкой 50×50 м. Наиболее интересные результаты получены на эталонном участке 2 (мерзлые пески), где установками обоих размеров зарегистрированы переходные процессы с двойной сменой знака. Анализ графиков приведенной ЭДС показывает, что первая смена знака с последующим быстрым переходом в положительную область имеет место в окрестностях временной задержки порядка 30 мкс, а вторая (хотя и менее резко проявленная, но статистически надежно выделяемая) — в пределах временного интервала 100—150 мкс.

В настоящее время интерпретация этого феномена может носить лишь предварительный и заведомо дискуссионный характер. Во всяком случае скорость спада и сам временной интервал, в пределах которого наблюдается первая (по времени) отрицательная ЭДС, согласуется с представлениями об ориентационной поляризации молекул содержащейся в песках замерзшей воды. Приближенная оценка характерного времени τ диэлектрической релаксации, выполненная по полевым кривым МПП, составляет 20—30 мкс, что соответствует температуре льда $-1\text{--}2^\circ\text{C}$ (см. рис. 1, а). Напомним, что по данным термометрии скважин для мерзлых песков в пределах рассматриваемого участка характерна именно такая температура. Учитывая тот факт, что на эталонном участке 1, представленном талыми песками, зафиксированы монотонно спадающие положительные переходные процессы, предсказанные теоретически [5—7], влияние ориентационной поляризации замерзшей воды на результаты МПП можно считать экспериментально доказанным.

Неожиданной оказалась смена знака ЭДС переходного процесса во временном интервале 100—150 мкс. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что в мерзлых песках наряду с ориентационной (дебаевской) имеет место еще одна, более медленная поляризация (характерное время релаксации по кривым МПП составляет первые сотни мкс). Существование этой относительно медленной поляризации подтверждено измерениями переходных характеристик РСВП с гальваническим возбуждением и приемом поля. Наблюдения проведены аппаратурой СО14 [3] в модификации зондирований с ортогональной установкой, что позволило, во-первых, минимизировать эффекты индукционного становления, а, во-вторых, изучить распределение кажущейся поляризуемости по вертикали. Переходная характеристика ВП регистрировалась в интервале 0,1—12,8 мс. В традиционном понимании кажущаяся поляризуемость в таком временном диапазоне относится к так называемой ранней стадии ВП и, насколько известно авторам, целенаправленно в условиях криолитозоны не изучалась. Кажущаяся поляризуемость η_k мерзлых песков при разносе $AN = 10$ м достигает 15%, а при разносе $AN = 70$ м — 36% (рис. 3, б). Общепринятой является точка зрения, согласно которой причиной столь высокой поляризуемости, наблюданной при измерениях ранней стадии ВП, являются электронные проводники преимущественно рудной природы [3]. Однако постоянные времена спадов ЭДС ранней стадии ВП мерзлых песков составляют 0,2—0,5 мс, что по меньшей мере на порядок ниже значений τ для рудных объектов. Оценки постоянных времени поляризации мерзлых песков по данным РСВП близки к моменту второй смены знака ЭДС, наблюданной в методе переходных процессов. Это обстоятельство свидетельствует в пользу предположения о том, что аномалии МПП на поздних (100—150 мкс) временах и наблюдавшиеся в методе РСВП вызываются одной и той же причиной. Отметим, что для талых песков η_k не превышает 4—6% при несколько пониженной скорости спада переходной характеристики РСВП. Очевидно, результаты описанных экспериментов отражают влияние как минимум двух разновидностей быстрой поляризации. Природу одной из них можно считать установленной (дипольно-ориентационной), в то время как другой еще только предстоит выяснить. В настоящее время можно лишь предположить, что причиной возникновения более мед-

ленной из двух наблюдавшихся разновидностей поляризации является эффект Максвелла — Вагнера [12, 16, 17].

Нам не удалось обнаружить публикаций, в которых бы сообщалось о возможности использовать метод РСВП для изучения мерзлых толщ. Именно поэтому мы были немало удивлены, когда выяснилось, что кривые метода РСВП при разделении мерзлых и талых песков характеризуются гораздо лучшей диагностической способностью, чем кривые кажущегося удельного сопротивления ρ_k метода ВЭЗ (рис. 3, а). Указанные факты дают основание полагать, что метод РСВП может оказаться весьма полезным при решении задач геокриологии.

Подводя итоги, отметим, что исследование ориентационной и других быстрых разновидностей поляризации целесообразно проводить не только во временной, но и в частотной области. Анализ опубликованной литературы по электромагнитной разведке криолитозоны с использованием гармонически изменяющихся полей показывает, однако, что с позиций измерения эффектов быстрой поляризации частотный диапазон в подавляющем большинстве случаев выбирался крайне неудачно [1]. Исследования проводились либо на слишком низких (десятки и сотни Гц), либо на очень высоких (десятки и более кГц) частотах, в то время как область максимальной частотной дисперсии диэлектрической проницаемости криогенных пород соответствует частотам 1—10 кГц [1, 2, 4, 14].

В заключение считаем своим долгом выразить благодарность сотруднику ЗАБНИИ В. И. Елизарову, оказавшему неоценимую помощь при проведении полевых исследований методом РСВП.

Выводы

1. Быстропротекающая вызванная поляризация мерзлых горных пород оказывает значительное влияние на результаты полевых наблюдений методами переходных процессов и РСВП.

2. В пределах мерзлой ВЧР исследованного полигона установлено наличие как минимум двух разновидностей быстрой поляризации. Одна из них характеризуется постоянной времени 20—30 мкс, что согласуется с результатами расчетов, выполненных ранее на основе теории Дебая для кольцевой модели криогенных пород. Вторая (относительно более медленная) поляризация представляет собой процесс, протекающий в масштабе времени порядка нескольких сотен микросекунд. Природа этого процесса не выяснена, но можно предположить, что причиной его возникновения является эффект Максвелла — Вагнера.

3. Полевые наблюдения быстроустановливающейся поляризации во временной области при индуктивном (МПП) и гальваническом (РСВП) способах возбуждения и приема поля открывают новые перспективы перед электроразведкой мерзлых толщ. При использовании гармонически изменяющихся электромагнитных полей их частота должна соответствовать области максимальной дисперсии поляризационного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов А. Т., Мельников В. П., Фролов А. Д. Геофизические методы изучения мерзлых толщ в СССР. Региональная разведочная и промысловая геофизика: Обзор (ВИЭМС). М.: 1979. 50 с.
2. Достовалов Б. Н. Электрические характеристики мерзлых пород // Тр. ин-та мерзлотоведения им. В. А. Обручева (Т. В. Электрометрия и ондометрия мерзлых толщ). М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 18—35.
3. Карасев А. П. Методика полевых наблюдений ранней стадии вызванной поляризации (РСВП). Чита: ЗАБНИИ, 1985. 22 с.
4. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. В 2-х кн. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 824 с.
5. Кожевников Н. О. Влияние диэлектрической релаксации на переходную характеристику криогенных образований // Геофизические исследования в гидрогеологии и инженерной геологии. Ч. II. Ташкент: САИГИМС, 1991. С. 61—64.

6. Кожевников Н. О. Влияние частотной дисперсии диэлектрической проницаемости на результаты измерений в методе переходных процессов. Деп. в ВИНИТИ 25.02.91, № 882—В91. Иркутск, 1991. 20 с.
7. Кожевников Н. О. Геоэлектрические модели и новые подходы к методике нестационарных электромагнитных зондирований верхней части разреза Восточной Сибири: Автореф. дис. ...д-ра геол.-мин. наук. Иркутск, 1992. 48 с.
8. Мазно Н. Наука о льде. Пер. с яп. М.: Мир, 1988. 231 с.
9. Ним Ю. А. Зондирования методом переходных процессов при исследовании криолитозоны: Автореф. дис. ...д-ра геол.-мин. наук. Иркутск, 1991. 39 с.
10. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики//Учеб. для вузов/Под ред. Богословского В. А. М.: Недра, 1990. 501 с.
11. Парселл Э. Электричество и магнетизм: Учебное руководство. Пер. с англ. М.: Наука, 1983. 416 с.
12. Сидоров В. А. Об электрической поляризуемости неоднородных пород//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 10. С. 58—64.
13. Снегирев А. М. Скважинная электрометрия мерзлой зоны литосферы. Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. Якутск, 1992. 43 с.
14. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. М.: Недра, 1976. 254 с.
15. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 440 с.
16. Alvarez R. Complex dielectric permittivity in rocks: a method for its measurements and analysis//Geophysics. 1973. V. 38. № 5. P. 920—940.
17. Olivar A. L. de Lima, Mukul M. Sharma. A generalized Maxwell—Wagner theory for membrane polarization in shaly sands//Geophysics. 1992. V. 57. № 3. P. 431—440.
18. Rosenberg G., Henderson J., Mac Donald J. C. The use of transient electromagnetic data on permafrost distribution for CDP static: Presented at the 55th Annual International Meeting of the SEG. Washington, 1985. 5 p.

Иркутский политехнический
инstitut

Поступила в редакцию
17.VI.1993

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

2 · 1995

УДК [002.63:681.3]:55

© 1995 г. С. А. ФИЛИППОВ, А. В. НИКОЛАЕВ, А. И. КОВАЛЬЧУК

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ГИС ПО ПОДЗЕМНЫМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОДАМ УРАЛА

С 1990 г. ИГиГ УрО РАН совместно с Комитетом по охране природы, областной СЭС и Геологическим комитетом ведутся работы по созданию банка данных по подземным водам Свердловской обл. и разработке систем управления базами данных с использованием персональных компьютеров типа IBM PC AT/XT. Основными задачами проводимых работ являются: 1) создание и постоянное пополнение баз данных по подземным и поверхностным водам Свердловской обл. и сопредельным территориям; 2) разработка системы управления банком данных с выдачей предэкспертных заключений по отдельным площадям и объектам; 3) разработка автоматизированной системы выдачи экологических экспертиз по подземным и поверхностным водам; 4) разработка рабочего варианта экологической экспертной системы.

Одной из важнейших фундаментальных задач современных естественных наук является внедрение новых компьютерных информационных технологий, позволяющих анализировать ситуации, используя весь имеющийся материал. Объемы фактического материала и количество существующих научных разработок по вопросам геологии и состояния окружающей среды в настоящее время достигли такого масштаба, что любые выводы, сделанные прежними «ручными» способами, в принципе не могут удовлетворять нас степенью своей обоснованности и уровнем проработки фактического материала. Геоэкологическая ситуация становится все более динамичной и уже практически не управляемой. Техногенное загрязнение окружающей среды в нашей стране достигло к настоящему времени весьма значительных размеров. Особенно ярко это проявляется в крупных промышленных регионах с интенсивной добычей полезных ископаемых. Свердловская область — это типичный образец такого региона. В некоторых районах Свердловской обл. деградация естественных природных условий достигла критического уровня, причем часть процессов уже имеет необратимый характер.

Гидросфера является важнейшей частью окружающей человека среды, так как именно водой осуществляется перенос значительных масс вещества в био- и литосфере. Неразрывной составной частью гидросферы являются подземные воды, которые в некоторых районах служат единственным источником водоснабжения населения и промышленности. Подземные воды чутко реагируют на загрязнение и очищаются с большим трудом. Исходя из этого следует признать, что оценка состояния подземных и поверхностных вод как по Свердловской обл. в целом, так и по отдельным конкретным объектам является важной народнохозяйственной задачей. Эта задача в настоящее время может быть решена лишь на основании сбора, обработки и анализа всего имеющегося материала по подземным и поверхностным водам.

По подземным и поверхностным водам Свердловской обл. и сопряженным с ней территориям накоплен большой объем информации, составляющей по нашим

оценкам более 500 000 единиц информации или более 400—450 Mb (мегабайт) объема электронной записи на магнитные носители. Из этого следует, что при работе с таким количеством информации невозможно обойтись без компьютерного банка данных и соответствующего программного обеспечения к нему.

Любые проводимые экологические экспертизы должны основываться на оптимальном объеме исходной информации и составляться по возможности как можно более оперативно. Эта задача также указывает на необходимость автоматизации процесса экспертизы на основе компьютерной сети и соответствующих пакетов прикладных программ. Сопутствующей проблемой является автоматизированная оценка достоверности и достаточности исходного материала при проектных и иных работах, включающих экологические заключения и выводы.

Решение перечисленных практических задач требует попутных теоретических исследований в области экологии, в частности в повышении достоверности прогнозирования состояния окружающей среды при разработке экспертных экологических заключений. В конечном счете все должно быть направлено на создание экологической экспертной компьютерной системы как по подземным водам, так и по другим природным факторам.

В этом направлении с 1990 г. Институтом Геологии и Геохимии УрО РАН совместно с Комитетом по охране природы, Областной СЭС (санитарно-эпидемиологической службой) и Геологическим комитетом ведутся работы по созданию геоинформационной системы (ГИС), включающей банк данных по подземным водам Свердловской обл. и систему управления базами данных (СУБД) «ПРИРОДА» с использованием персональных компьютеров типа IBM PC AT/XT. Основными задачами проводимых работ являются: 1) создание и постоянное пополнение баз данных по подземным и поверхностным водам Свердловской обл. и сопредельным территориям; 2) разработка системы управления банком данных с выдачей предэкспертных заключений по отдельным площадям и объектам; 3) разработка автоматизированной системы выдачи экологических экспертиз по подземным и поверхностным водам; 4) разработка рабочего варианта экологической экспертной системы.

За время работ накоплен ценный опыт работы с большими объемами геоэкологической информации, разобрана ее структура, качество, достоверность и важность с точки зрения геоэкологической информативности. Следует отметить, что даже принципы программирования СУБД коренным образом менялись по мере ввода в компьютеры потока информации и нарастания ее объема, который в настоящее время достиг 100 Mb.

Различными организациями и ведомствами по мере распространения персональных компьютеров типа IBM и благодаря наличию несанкционированных копий мощных зарубежных пакетов разработки программ типа СУБД создается большое количество мелких и даже крупных прикладных программ геоэкологической или геологической направленности. Как правило, эти программы не работают, так как даже при корректной постановке задачи программисту программа пишется при полном отсутствии введенной на магнитные носители информации. И эти, иногда очень талантливо написанные пустые оболочки баз данных, лежат мертвым грузом, изредка напоминая о напрасно затраченных средствах.

При разработке принципов построения нашей информационной системы был проработан доступный зарубежный опыт. Его анализ показывает, что наше отставание в уровне охвата пользователей информационной средой составляет не менее 30—40 лет, а в управлении информационными потоками просто нечего сравнивать. Наиболее неприятный для нас вывод при этом заключается в том, что громадный современный зарубежный опыт практически невозможно напрямую использовать в наших условиях. Это обуславливается кроме всего прочего и тем, что параллельно с развитием компьютерных технологий и информационных сред сильнейшее изменение претерпевали структура и состав информации, а также ее ввод, вплоть до прямого поступления аналитических данных с приборов в базы данных. В наших реальных условиях (без учета особенностей текущего момента)

при создании компьютерных справочников любого объема, не говоря уже о банках данных, две трети средств и времени затрачивается на доступ к информации, ее изучение, оценку и подготовку к вводу на электронные носители.

Первые ГИС, ориентированные в основном на учет земель, применялись в Канаде и Швеции уже в начале 60-х годов. В настоящее время ведущими зарубежными фирмами являются TERRASOFT (Канада), ARK/INFO (США), APPLE-7 (США). Стоимость программного обеспечения (без стоимости техники и затрат на сбор информации и ее обработку) составляет от нескольких сотен тысяч долларов до нескольких миллионов. Подавляющее большинство ГИС базируется на высокоточных электронных (цифровых) картах. Такие масштабы и уровень технического обеспечения нам не доступны.

Обзор публикаций по данной теме показывает, что за рубежом в последнее время получают все большее распространение базы данных и банки данных на базе персональных компьютеров нового поколения (например, IBM PC AT-386, 486), по необходимости объединяемых в локальные сети [5—9]. Аналогичную конфигурацию имеет и наша разработка, что не исключает возможность переноса баз данных на аппаратуру более высокого класса.

В ближнем зарубежье (пределах бывшего СССР) ощутимые результаты в данном направлении, судя по публикациям, получены в Казахстане [1, 3]. В Алма-Ате при НПО «КазЭкоЕксп» создается интегрированная система баз данных и знаний для задач управления природопользованием (по сообщению Коростелева В. А.). Там существует республиканский научно-производственный и информационный центр «КазЭкология» при Госкомприроде, где начинает функционировать АСУ сбора и обработки экологической информации. Большое внимание в ней уделяется информационной части, так как карты являются лишь одним из способов работы с информацией. Работы в данном направлении ведутся и в других регионах [2, 4]. Однако о существовании действующей областной информационной системы по гидрогеологии, гидрологии или экологии в каком-либо регионе пока сведений нет. Кроме того, в материалах различных совещаний и выставок, а также в периодической печати есть сведения о том, что в указанном направлении ведутся работы в Эстонии (университет Тарту), где уже около 2 лет применяется аналог зарубежной ГИС. Действовала пробная система в Тбилиси, где в масштабах республики проводился ежедневный мониторинг с вертолета, а сводки о состоянии среды в республике сообщались по телевидению (руководитель работ проф. Беруашвили Н. Л. из Тбилисского университета). В Брянске идут работы в направлении создания ГИС-центров при областных и краевых комитетах по охране природы с участием ученых университета Брянска (сообщение Акменкова Н. В.— председателя комитета по охране природы). Включается информация по разделам: атмосфера, водные системы, почвы, радиационный мониторинг, твердые бытовые и промышленные отходы, животный и растительный мир. В Мурманске создается Экоинформационный центр при Облкомприроде, работы которого стимулируются шведской стороной, в том числе валютными кредитами. Есть близкие разработки в Киеве (СП «Интеркомпьютер», АН УкрРСКТБ ПО Института кибернетики — «GIOMIN»), Перми, Москве (ВНИИЦлесресурс Госкомлес РФ; ВНИИСИ РАН — «СИМО»; «АРХИМЕД»; СП «ХОРОС» — ПКО «Картография ГУГК РФ»; «КАПРИЗ»; ГИС — система «Землепользование» СП «ИНТЕРКВАДРО»; ВНИЦ АИУС «АГРОРЕСУРСЫ»; система ГНПФ «Среда» при Мосгорисполкоме), Новосибирске («КАСКАД») и др.

Одним из основных принципов нашей работы по созданию геоэкологической информационной системы было формирование открытого дружественного интерфейса всей системы, что позволяло не отмечать уже сделанные прикладные программы, а присоединять их возможности, наращивая мощность программного блока банка данных.

В создаваемой системе заложены и совершаются принципы прямой совместимости с такими разработками, как автоматизированная информационная система государственного водного кадастра (АИС ГВК) и им подобным. Кроме

того, уже начаты передовые разработки по созданию продолжения и расширения банка данных за счет включения баз данных по воздушной среде, растительному и животному миру, болотам, лесам и т. п. Работы сдерживаются недостатком материальных средств и трудностями со сбором информации.

Структура внешней информации, накопленной к настоящему времени, характеризуется крайней неоднородностью. При оценке ее объема, доступности, полноты и характера учитывался не только непрерывный поток поступающей новой информации, но и оптимальный объем той части информации прошлых лет, которая необходима в базах данных для корректного сравнительного анализа. В результате этих работ выяснилось, что большой объем данных прошлых лет использовать невозможно из-за отсутствия конкретных пространственно-временных привязок, условной подачи данных (условные формулы, проценты и т. д.), а также из-за отсутствия ссылок на конкретный источник информации. На первых этапах оценки качество аналитических методов практически не учитывалось. В последующем, при сравнении различных источников информации были выбраны те, где качество аналитики и точность привязки объекта к местности позволяли идентифицировать объекты во временных рядах и пространственно. Среди источников информации используются конкретные паспорта скважин (например, из разрешений на спецводопользование), изданные кадастры буровых на воду скважин и фондовые производственные отчеты, в которых приведены конкретные данные по скважинам. В меньшей мере используются тематические работы и опубликованные данные из-за сильного искажения и подгонки в них фактического материала. Оценен и объем информации. Поток ежегодной информации удобнее всего измерять в единичных определениях (анализах) качества воды. Для Свердловской обл. он оценивается примерно такими цифрами (по ведомствам): УПГО «Уралгеология» — 40 000, Метеоцентр — 30 000, Росводхоз (УралНИИВХ) — 30 000, Областная СЭС — 400 000, промышленные предприятия — 2 000 000 — 2 500 000. С учетом сортировки, разбраковки и оптимизации данных суммарный поток информации для ввода в базы данных составляет не менее 80 000 — 100 000 определений в год в дополнение к 500 000 определениям более раннего времени, необходимых в банке данных для выдачи сравнительных характеристик. Кроме основной («базовой») информации заполняются базы данных (справочник) по стандартам и эталонам на подземные воды с учетом мирового опыта. Справочные и эталонные базы данных содержат информацию о предельно допустимых концентрациях (ПДК), минеральных водах и рассолах как по СНГ, так и по всему миру с обязательными ссылками на источник информации. Формируются справочники по предприятиям-водопользователям, экспертам по различным вопросам геоэкологии, лицензиям и специальной литературе. Все файлы набираются на IBM PC в формате .dbf. Основной формой хранения единичной информации о подземных и поверхностных водах является «физическая запись», ближе всего ассоциирующаяся с понятием СУБД record. Это единичная запись файла формата .dbf с количеством полей до 100 и более, включающая обязательные имена, размеры и типы полей. К обязательным данным относятся привязка физической точки и наличие данных по одной из «тем» банка данных: гидрохимии, литологии, физическим свойствам, бактериальному анализу или гидродинамике. При вводе в основную базу данных каждой записи присваивается личный неповторяющийся номер — label и затем производится разброска физической записи по 12 тематическим файлам для более плотной упаковки. Каждая физическая запись имеет хотя бы одну из четырех координат, отличную от другой физической записи: географические координаты, абсолютную отметку или дату, что характеризует понятие «физическая точка». Это такая точка, которая отличается от подобной расположением в пространстве или во времени. Например, в одной и той же скважине брали пробы с различной глубины — это разные физические точки. Или отбирали пробы воды в разное время — это тоже различные физические точки. После выделения физических точек как самостоятельных единиц информации их можно объединять в любые более высокие иерархические системы:

объекты, площади, месторождения, районы и т. д. Причем число иерархических ступеней может быть у различных пользователей банка данных любое.

Информация по каждой физической точке может быть различной степени полноты, причем верхний предел не устанавливается ни программно, ни технически и контролируется только количеством флоппи-дисков или кассет стримера. Набор информации операторами по вводу информации осуществляется при помощи специальной программы «ОПЕРАТОР», которая может быть установлена на IBM-совместимых компьютерах любой конфигурации. В нашем случае работали от 2 до 8 операторов на 4 компьютерах, включая машины отечественного производства. Программа «ОПЕРАТОР» предусматривает первичный контроль за качеством вводимой информации и позволяет вводить как разрозненную информацию, так и пообъектную. Объекты (месторождения, площади, поселки, площадки и т. д.) назначаются пользователем и проверяются администратором банка данных. Сформированные программой «ОПЕРАТОР» файлы первичного ввода имеют открытый формат и линейную структуру (до 150 полей в файле). Затем эти файлы последовательно вводятся только через один единственный компьютер администратора банка данных в основную базу данных при помощи специальной программы «VVODMAIN». После пополнения баз данных они обновляются у всех пользователей. Редакция баз данных для пользователей запрещена. При такой организации информационного потока сводятся до минимума сбои любого прикладного программного обеспечения и несогласования данных у различных пользователей. Для оптимально компактного хранения информации программой «VVODMAIN» организуются 12 главных файлов базы данных и наращиваемое количество файлов справочников. Разбивка именно на 12 файлов обосновывается тщательной статистической обработкой большой массы данных и скоростными возможностями программно-аппаратного обеспечения. До этого были использованы самые различные варианты, приведшие в конце концов к оптимуму. В эти файлы входят: ADRES. DBF — привязка точки к местности (текстовая описательная); PLTPPLACE. DBF — главные сведения о точках (координаты, номер, район, объект, даты, номер спецводопользования, абсолютная отметка и т. д.); CHARAC. DBF — характеристика точки и сведения об использовании; ТЕХНИКА. DBF — техническое устройство или обустройство (скважины); CHIM-BAK. DBF — бактериальные анализы; MEMORY. DBF — примечания (любые); CHIM-PRI. DBF — элементы — примеси; LITOLOGY. DBF — литология; GYDRODIN. DBF — гидродинамика; PHISIC. DBF — физические свойства воды; CHIM-TWO. DBF — второстепенные химические элементы; CHIM-ONE. DBF — главные химические элементы. Файл литологии учитывает до 15 слоев на каждую скважину с потенциальной возможностью увеличения до 100 и более. Разбивка химического состава по элементам на главные и второстепенные произведения статистической обработкой по частотным гистограммам при помощи пакета Statgraph. Файл примесей организован так, что к любой физической точке можно записать любое количество элементов и соединений примесей, не вошедших в главные и второстепенные. Для управления базами данных написана главная программа, которая осуществляет быстрый поиск и выборку любого количества данных по любым «темам», хранение на диске или архивацию по районам и объектам с целью экономии места на жестком диске (объем всей системы не более 7 Mb, включая архивные файлы районов). В программе предусмотрена возможность прямой и косвеннойстыковки любых прикладных программных блоков (расчет воронки депрессии, проверка на ПДК, расчет зоны санитарной охраны и т. д.), есть возможность построения простых графиков, работа с текстовыми редакторами и литературой.

Вся система позволяет в течение нескольких дней перестроить меню и справочники на другую административную область (есть опыт с Челябинской) или на параллельную тематику (воздушная среда, геофизика, минералогия и т. д.).

Как уже отмечалось выше, разработка принципов создания информационной системы по геоэкологии потребовала теоретических изысканий, в той или иной

мере затрагивающих некоторые фундаментальные вопросы геоэкологии и гидроэкологии. Особое значение в этом плане имеют исследования структуры и характера существующих информационных потоков и их взаимосвязи с ранее накопленной информацией, необходимой для анализа динамики процессов. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения степени фактической обоснованности различных гидро- и геоэкологических теорий, необходимых для создания интеллектуального блока экспертной системы. Тесно связан с этим и вопрос об изменении некоторых методических и технических параметров, применяемых в повседневной практике гидрогеологических работ, влияющих на характер и структуру получаемой информации.

Считаем, что предлагаемый подход к созданию подобных систем, идеология и аппаратные решения позволяют даже в современных сложных социально-экономических условиях в течение 3—5 лет создавать необходимые информационные системы по различным природным факторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айтуюров Т. К., Джумангулов М. Т. Изучение и прогноз режима подземных вод в естественных условиях и под влиянием техногенных процессов // Пробл. гидрогеологии и охраны геологической среды Казахстана. Алма-Ата: 1990. С. 56—58.
2. Игнатенко Б. В., Коваленко И. И., Кракевич В. Е., Мишаков В. А. Банк данных экологического состояния гидросфера // Киев: Автоматика, 1984. С. 30—34.
3. Исабаев Т. Т. К вопросу о подземной гидросфере под воздействием техногенных процессов // Регион. гидрогеол. исслед. в Казахстане. Алма-Ата: 1989. С. 33—36.
4. Куренной В. В., Цыганов Г. А. Информационная структура систем сбора, хранения и обработки гидрогеологических и инженерногеологических данных в связи с автоматизацией этих систем // Применение мат. методов и ЭВМ в гидрогеологии и инженерной геологии // Ташкент: НИИ гидрогеол. и инж. геол., 1990. С. 45—46.
5. Baker David B. Groundwater quality assessment through cooperative private well testing: An Ohio example // J. Soil and water Conserv. 1990. № 2. P. 230—235.
6. Evans Barry M., Myres Wayne L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC // J. Soil and Water Conserv. 1990. № 2. P. 242—245.
7. Franko Ondrej, Bodis Dusan. Paleohydrogeology of mineral — waters of the Inner West Carpathians // Zap. Karpatsk. Ser. hydrogeol. a inz. geol. 1989. № 8. P. 145—163.
8. Jadkowski Mark A., Dutman Paul W. Maine Groundwater data management system Ursia Pros pap. annu Conf. Urdan and Reg. inf. syst. Assoc. Boston, MASS. Washington (D. C.). 1989. № 4. P. 318—332.
9. Osterkamp G., Richter B., Skala W. An expert system for groundwater risk assessment. Groundwater Contamination: Use Models Decision-making: Proc. Int. Conf. Amsterdam, 26—29 Oct., 1987. Dordrecht etc. 1989. P. 59—62.

Институт геологии
и геохимии УрО РАН

Поступила в редакцию
15.IX.1993

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

2 · 1995

М. С. ГОЛИЦЫН, В. Н. ОСТРОВСКИЙ, Л. А. ОСТРОВСКИЙ,
Д. И. ПЕРЕСУНЬКО

По поводу статьи В. А. Мироненко «О КОНЦЕПЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА» (Геоэкология, № 1, 1993 г.)

Геоэкологические проблемы в последние годы активно обсуждаются многими специалистами. Это понятно, так как становление нового экологического направления в геологии невозможно без всесторонней дискуссии по ее фундаментальным проблемам, одной из которых является концепция государственного экологического мониторинга подземной гидросферы (ГЭМР), рассматриваемая в содержательной дискуссионной статье В. А. Мироненко.

Следует всячески приветствовать внимание ученых Российской академии наук к практическим задачам геологической отрасли, испытывающей коренную хозяйственную и структурную перестройку. Не касаясь формы изложения отдельных положений статьи В. А. Мироненко, которую каждый автор выбирает индивидуально, по существу считаем необходимым отметить следующие дискуссионные моменты.

Не четко, если не сказать больше, определены объекты ГЭМР, отсутствует их типизация применительно к сложным и многообразным природным и техногенным условиям России. С одной стороны, предполагается решение в рамках системы ГЭМР фундаментальных проблем гидрогеологии (например, «вскрытие и физико-математическое описание процессов и механизмов определяющих движение и трансформацию подземных вод», с. 25), а с другой — в заключительной части статьи задачи ГЭМР сводятся в основном к выбору универсальных показателей качества подземных вод и лишь в перспективе к созданию новой технологии контроля.

Подход к мониторингу подземных вод отличается узостью. В статье речь идет только о питьевых подземных водах, хотя общеизвестно, что роль любых подземных вод в целом чрезвычайно широка. Достаточно назвать минеральные лечебные, теплоэнергетические и промышленные подземные воды и рассолы. Автор не касается вопросов организации мониторинга подземных вод на локальном и региональном уровнях, ограничиваясь высшим — государственным.

Основная проблема в организации ГЭМР — определение объектов исследований, их пространственно-временных границ, типизация этих объектов, разработка принципов размещения пунктов и программ наблюдений. В. А. Мироненко отмечает, что ГЭМР должен строиться исходя из площадного (1 скважина на 50—200 км²) размещения наблюдательной сети, организованной на 3—4 специальных представительных полигонах (так называемая пилотная стадия ГЭМР), и трехлетнего периода наблюдений на них. Такой подход правомерен лишь на стадии внедрения принципиально новых методов и технологий. В России ситуация сегодня иная. Имеется почти 60-летний срок функционирования режимной службы наблюдений за подземными водами. Речь, следовательно, должна идти о реорганизации этой службы применительно к задачам мониторинга,

об изменении ее правовых, финансовых и организационных основ в условиях ужесточившихся экологических требований. Эту проблему В. А. Мироненко не затрагивает. Предложенный порядок реализации программы ГЭМР состоит из 12 пунктов, является традиционным, излишне многоструктурным и недостаточно мобильным для оперативного реагирования на острые экологические ситуации.

В. А. Мироненко считает излишним проведение специализированных геоэкологических исследований и картографирования (ГЭИК) разных масштабов, а их концепцию — «порочной» (с. 26). По его мнению, вместо ГЭИК необходимо выполнение специальной геоэкологической съемки СГЭС, которая может быть объединена с программой ГЭМР. Но последняя касается лишь экологического мониторинга подземной гидросферы, а ГЭИК направлен на исследование геологической среды как целостной системы, характеризуемой не только гидрогеологическими, но и геохимическими, инженерно-геологическими, биологического-почвенными и другими параметрами, изучение которых программой ГЭМР не предусматривается. Методологически неверно подчинять комплексное изучение всех компонентов геологической среды, решению хотя и важных, но частных задач, предусмотренных ГЭМР. ГЭИК имеет более широкое и самостоятельное значение, независимое от мониторинга, так как дает «экологический портрет» геологической среды, позволяющий обосновать определенные мероприятия по рациональному использованию и охране геологической и окружающей среды, не дожидаясь результатов мониторинговых наблюдений.

В. А. Мироненко возражает против обязательного регионального геоэкологического изучения территорий с напряженной геоэкологической обстановкой в целях создания картографической базы для обоснования и размещения мониторинговых сетей, считая это рецидивом «старых добрых подходов». Он полагает, что для проведения ГЭМР достаточно имеющихся гидрогеологических карт масштаба 1 : 200 000. Вопрос по сути стоит так: нужно ли систематическое комплексное региональное изучение территорий в экологических целях? В. А. Мироненко дает на него отрицательный ответ. Однако вся практика отечественных и мировых геологических исследований свидетельствует о том, что базовым инструментом решения региональных и локальных задач являются карты.

Ценность гидрогеологических карт масштаба 1 : 200 000 для разработки ГЭМР В. А. Мироненко, по нашему мнению, преувеличивает. Эти карты составлялись для многих районов с напряженной экологической обстановкой 25 и более лет назад и не отражают техногенных изменений гидрогеологических условий. Общая информативность карт для решения геоэкологических задач сравнительно невелика. ВСЕГИНГЕО предусмотрены существенные ужесточения требований к их составлению.

В статье по существу отвергается целесообразность комплексного одновременного изучения геологической среды специалистами разных дисциплин, объединенных, по выражению В. А. Мироненко, «модной экологической шапкой». Мы могли бы принять эти возражения, если бы предлагалась альтернатива.

Справедливо замечание о беспersпективности механического объединения возможностей различных специальностей, что иногда происходит при проведении ГЭИК. Задача состоит именно в том, чтобы разработать концепцию и методы интеграции, взаимного дополнения и проверки разнородной геоэкологической информации, чтобы оценить состояние всех взаимосвязанных компонентов геологической среды.

Следует согласиться с мнением В. А. Мироненко о слабой разработке в «Требованиях к ГЭИК», составленных ВСЕГИНГЕО, вопросов геоэкологического прогнозирования, но эта проблема не решена даже в концептуальном плане. Мы имеем более или менее разработанный аппарат гидрогеодинамических, гидрогеохимических, геохимических, инженерно-геологических и других прогнозов, но их синтез в виде методологии интегрального геоэкологического прогноза отсутствует.

Дискуссионно замечание В. А. Мироненко в том, что слово «исследования»

неуместно для комплекса обязательных операций, каковым, по его мнению, должен являться ГЭИК. Но суть ГЭИК — дополнение традиционных геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и других работ определенным объемом исследований экологической направленности. В разнообразных и слабоизученных геоэкологических условиях России, при многообразии техногенной нагрузки на окружающую среду практически невозможно и во многих случаях даже вредно жестко регламентировать виды и объемы работ. Поэтому сознательно использован достаточно свободный термин «исследования», развивающий у исполнителя работ определенную творческую инициативу.

Сейчас нет недостатка в концепциях мониторинговых исследований и задача состоит не в том, чтобы перераспределить финансовые и другие ресурсы в пользу той или иной концепции, а интегрировать все лучшее из имеющихся подходов. Во ВСЕГИНГЕО разработан «Технический проект мониторинга геологической среды», находящийся в стадии реализации. Этот технический проект, выполненный при участии десятков специалистов, мог бы являться базой для объединения усилий в создании системы государственного эколого-геологического мониторинга России.

Подводя итоги, следует с сожалением констатировать, что крупный ученый-гидрогеолог В. А. Мироненко забывая о «всюдности» (по выражению В. И. Вернадского) подземных вод, о их определяющей роли в современных экзогенных и эндогенных процессах, о единстве и взаимосвязи всех компонентов геологической среды, невольно оказался выразителем интересов лишь одной хозяйственной подотрасли — централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. В его концепции по существу игнорируются интересы геологии, горного дела, строительства и других отраслей народного хозяйства.

Вероятно на страницах журнала «Геоэкология» следует продолжить дискуссию о концепциях мониторинга подземной гидросферы, вопросах рационального изучения, использования и охраны геологической среды России.

УДК 624.131 : 550.38

© 1995 г. А. А. СУХАНОВ, Ф. М. ЛЯХОВИЦКИЙ

КОМПЬЮТЕРИЗОВАННЫЙ АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА»

В ВНИГИК НПГП «ГЕРС» ведется разработка передвижного автоматизированного комплекса для геофизических исследований при изучении и оценке инженерно-геологических условий для обоснования проектирования и строительства нефтепромысловых горнодобывающих и прочих промышленных и гражданских сооружений.

Актуальность и необходимость данной разработки вызвана целым рядом факторов, рассматриваемых в данной статье.

Существующая в настоящее время технология получения необходимой для обоснования проектирования и строительства различных народнохозяйственных объектов информации при изысканиях в многообразных инженерно-геологических условиях не отвечает современным требованиям. Применяется ограниченный комплекс исследований скважин. Используемая аппаратура не обеспечивает одновременное получение комплексной характеристики исследуемых объектов на основе изучения физических и физико-механических свойств грунтов геофизическими и лабораторными методами для получения необходимых параметров. Обработка полученных данных проводится, как правило, вручную, что недопустимо затягивает выдачу соответствующих заключений.

Наиболее качественная информация может быть оперативно получена на основе применения единого передвижного аппаратурно-методического комплекса (АМК), созданного на базе геофизических и инженерно-геологических методов исследований с использованием в комплексе вычислительной техники.

В настоящее время в нашей стране нет эффективных комплексов, объединяющих геофизические и инженерно-геологические исследования. Для исследования скважин глубиной до 300—500 м в инженерной геологии используются обычно переносная каротажная лаборатория АКС-П-65 или самоходные станции типа СК (сейсмического каротажа).

За рубежом изготавливается ряд портативных каротажных установок, среди которых наиболее распространены венгерские станции KLT-2 и K-600 (ПС, КС, ГК, НГК, ГГК¹), шведская установка SAS log 200 (ПС, КС, термометрия), ряд установок выпускается в США (фирма «GISCO» и др.).

Перечисленные отечественные и зарубежные лаборатории предназначены для работы с аналоговыми скважинными приборами, и в них используются только аналоговые регистраторы. Наиболее эффективными являются скважинные приборы и регистраторы, использующие цифровую запись. Это обеспечивает высокую помехоустойчивость, возможность хранения и обработки информации с помощью компьютера. Такого рода аппаратура создана в Англии (фирма «Робертсон»), Японии (фирма «ОУО»), Швеции (фирма «АВЕМ»).

В России в НПО «Рудгеофизика» заканчивается разработка аппаратуры

¹ Имеются в виду геофизические методы: КС — кажущегося сопротивления; ГК — гамма-каротаж; НГК — нейтрон-гамма-каротаж; ГГК — гамма-гамма-каротаж; ПС — собственной поляризации.

КСКА-01П, в которой предусмотрено преобразование аналоговых и импульсных сигналов в цифровой код. В состав аппаратуры входят скважинные приборы диаметром 36 мм и наземный пульт, включающий составные части мини-ЭВМ. Объем внешней памяти незначительный и составляет 64 кбайт. Такой объем памяти позволяет произвести регистрацию в интервале ствола скважины до 300—500 м одним скважинным прибором, после чего наземная аппаратура должна быть доставлена к стационарной ЭВМ типа СМ-4, СМ-1800 для считывания и обработки информации, что невозможно при работе в удаленных районах и большом объеме исследований. Регистрация волновых картин при широкополосном АК вообще невозможна этой аппаратурой как по объему памяти, так и по быстродействию, что полностью исключает возможность определения физико-механических свойств пород по данным каротажа. Нет программно-методического обеспечения для обработки результатов исследований. Предусмотрено только программное обеспечение нижнего уровня — регистрация, редактирование.

Аппаратура КСКА-01П переносная, использование ее целесообразно для исследования скважин, пробуренных из подземных горных выработок. Применение аппаратуры КСКА-01П требует внешнего спуско-подъемного оборудования и внешнего электропитания (220 В, 50 Гц). Для визуализации результатов требуется внешнее регистрирующее устройство.

Таким образом, аппаратура КСКА-01П является только частью каротажной станции, использование ее в предлагаемом к разработке АМК не целесообразно.

Из изложенного следует, что в настоящее время нет отечественных каротажных установок, удовлетворяющих современным требованиям к исследованиям скважин достаточным комплексом методов и обработкой большого объема информации для целей инженерной геологии.

Предлагаемый к разработке компьютеризированный аппаратурно-методический комплекс «Инженерная геофизика» включает аппаратуру для геофизических исследований скважин, приборы для лабораторного исследования грунтов, программно-методическое обеспечение для регистрации, редактирования, оперативной обработки и комплексной интерпретации полученных данных и аналогов в настоящее время не имеет. Комплекс будет оснащен геофизической и инженерно-геологической аппаратурой, разработанной на уровне изобретений.

Оригинальные методики изучения параметров горных пород, как правило, имеют «Ноу хау». АМК «Инженерная геофизика» предназначается для проведения геофизических исследований скважин и лабораторных измерений прочностных и деформационных свойств грунтов в различных инженерно-геологических условиях с целью обоснования проектирования и строительства нефтепромысловых, горнодобывающих, гидротехнических, транспортных и других промышленных и гражданских сооружений. Применение комплекса предполагается в изыскательских организациях, а также в производственных и проектных организациях соответствующих отраслей.

В составе передвижного АМК предусматривается использование аппаратуры и оборудования для исследования скважин следующими геофизическими методами²: ГК, ГГК-П, ННК (НГК), ПС, КС, БК, ЭМК, АК, резистивиметрия, кавернометрия, инклинометрия. Планируется использовать скважинные приборы разработки ВНИИГИС (г. Октябрьский).

Вопрос о рациональном комплексировании перечисляемых методов решается в каждом конкретном случае в зависимости от поставленных задач. Так, комплексное применение методов ГГК-П и АК позволяет определять в условиях естественного залегания пород их физико-механические свойства, такие, как коэффициент Пуассона, модуль Юнга, модуль сдвига, модуль сжатия и др.

Совместное использование данных радиоактивного, электрического и

² ГГК-П — гамма-гамма-каротаж плотностной; БК — боковой каротаж; ЭМК — электромагнитный каротаж; АК — акустический каротаж.

акустического каротажа позволяет решать задачи количественной оценки пористости, проницаемости пород, характера их насыщения, выделения в разрезе трещиноватых и кавернозных пород и т. д.

Диаметр всех скважинных приборов 36 мм, что позволяет проводить исследования в скважинах диаметром от 46 мм и более. Глубина исследуемых скважин до 300 м. Вся скважинная аппаратура программно-управляемая, регистрация параметров осуществляется в цифровом виде на магнитный носитель с одновременной визуализацией данных.

Кроме геофизической аппаратуры в АМК предусматривается использование лабораторных приборов на микропроцессорах для определения физико-механических параметров грунтов, характеристик сжимаемости, просадочности, влажности, плотности твердой фазы и др. Регистрация этих параметров также цифровая.

Разрабатываемые программно-методические средства позволяют получать необходимые оперативные заключения по результатам исследования непосредственно в полевых условиях, путем совместной обработки данных геофизических и лабораторных исследований на базе бортовой ЭВМ с объемом внешней памяти (ОЗУ) не менее 1 Мбайт.

Наземная часть аппаратуры комплекса состоит из бортовой мини-ЭВМ (IBM PC/AT), блока питания скважинных приборов, накопителя на магнитном носителе, блока управления скважинными приборами, датчика меток квантования глубины. Спуско-подъемное оборудование состоит из лебедки емкостью 300 м, одножильного бронированного каротажного кабеля, электропривода лебедки. Предусматривается генератор для питания аппаратуры, привода лебедки, систем отопления и кондиционирования лаборатории. Генератор работает от двигателя автомобиля.

Программно-управляемая лаборатория, спуско-подъемное оборудование с комплексом датчиков, комплекс скважинных приборов и приборы для определения свойств грунтов размещаются на шасси автомобиля (ЗИЛ, Урал, КАМАЗ).

При разработке аппаратурно-методического комплекса будут использованы результаты исследований кафедры инженерной геологии и охраны геологической среды МГУ им. М. В. Ломоносова и других организаций, касающиеся оценки свойств грунтов.

Экономическая эффективность разрабатываемого комплекса будет складываться из наличия новых методов изучения горных пород, значительно ускоряющих получение необходимой информации, автоматизации обработки результатов исследований, значительного ускорения принятия проектных решений и возможности экспертных оценок в процессе проектирования будущего строительства.

Использование разработанного автоматизированного аппаратурно-методического комплекса позволит существенно повысить качество, полноту и достоверность получаемой инженерно-геологической информации и эффективность инженерно-геологических исследований за счет сокращения себестоимости и сроков проведения полевых работ, что позволит давать обоснованные заключения о возможности строительства промышленных и гражданских сооружений, а также эколого-геологическую оценку территории.

В качестве потребителей разрабатываемого комплекса могут быть проектно-изыскательские организации СНГ (Гидропроект, Совинтервод, ПНИИС, БелГиЗ, УкрГИИЗ, Надымгазпром, концерн Газпром и т. д.) и зарубежных стран.

Предполагаемая потребность в таких комплексах определяется следующими расчетами. На 1 января 1992 г. в государственном секторе имелось 3500—4000 проектно-изыскательских организаций, являющихся потенциальными потребителями комплекса. Исходя из предположения о приобретении комплекса каждой десятой организацией, потребность в них составит 350—400 штук.

ВНИГИК НПГП «ГЕРС»
Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
27.V.1993

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

2 · 1995

Е. М. СЕРГЕЕВ

О наших коллегах в области инженерной геологии

Чуть ли не с детских лет я привык считать, что если что-то сделано за границей, то это должно быть лучше, чем сделанное у нас самих «дома». «А, это советское?» — и разочарование. Так продолжалось, наверное, до Великой Отечественной войны. Да и позднее тоже. Что греха таить, и сейчас мы еще отстаем от других стран во многих случаях, хотя в вопросах науки (о других не берусь судить) мы на уровне, а иногда и впереди наших коллег.

В нескольких своих работах я писал об исследованиях, проводившихся Каракумской экспедицией МГУ еще в 50-х годах. Тогда удалось понять природу кольматации мелкозернистых песков. Основные результаты были опубликованы у нас в стране и за рубежом.

Первыми меня пригласили выступить с лекцией наши ближайшие соседи — университет города Хельсинки. Инженерно-геологические условия территории Финляндии таковы, что кольматация песков, да еще мелкозернистых, которую мы изучали в то время, не могла интересовать моих коллег и их студентов, и поэтому эти вопросы в лекции не рассматривались. Удивительно, что лекция была выслушана с большим вниманием, а потом даже опубликована в журнале университета, о чем сам автор узнал через несколько лет во Франции, в геологическом центре в Орлеане.

Следующее приглашение прочесть цикл лекций по грунтоведению я получил из Норвегии (г. Осло); приглашали две организации: университет Осло и Норвежское геотехническое общество, имевшее свой институт, директором которого был проф. Л. Бьеррум; в университете инженерную геологию возглавлял Иван Розенквист (дед у него был русский, но русского языка он почти не знал). Объектом его исследования были устойчивость и закрепление склонов морских берегов, сложенных молодыми морскими глинами.

Очень известным ученым в то время был проф. Л. Бьеррум — директор норвежского Геотехнического института в Осло. Он руководил всей деятельностью института, проводившего изыскания по прочности и устойчивости горных пород, не только в Норвегии, но и далеко за ее пределами, вплоть до Австралии.

У меня с Л. Бьеррумом и И. Розенквистом сложились хорошие отношения. Оба приезжали с женами в Москву и выступали с лекциями в МГУ при полных аудиториях. К сожалению, Бьеррум рано умер. Он поехал в Англию навестить обучавшегося там сына и скончался от сердечного приступа. Со временем ослабли связи и с Иваном Розенквистом — научные интересы стали различными. Но друг к другу мы никаких претензий не имели.

В какой-то степени продолжением советско-скандинавских отношений в области инженерной геологии явились связи моих учеников с проф. Пушем при изучении морских скандинавских глин.

Я с благодарностью вспоминаю своих скандинавских коллег. Думаю, что наше общение принесло пользу в решении различных инженерно-геологических проблем. Кроме того, в 1955 г., когда в Копенгагене проходил очередной международный Конгресс геологов, на котором работала секция «гидрогеология», где обсуж-

дались и инженерно-геологические проблемы, мы, советские ученые, не чувствовали себя одинокими благодаря нашим скандинавским друзьям. Возникали трудности главным образом языкового характера. У меня был плохой немецкий язык, с небольшим запасом слов. Несмотря на это, я принял предложение немецкого Автодорожного института в Дрездене прочитать несколько лекций в течение 2 недель. Лекции переводил переводчик, аспирант из Украины, а в быту я должен был обходиться самостоительно. Для меня эти две недели были мучительно тяжелыми. Но когда мы возвращались из Дрездена на машине в Берлин, я вдруг понял, что до меня доходит смысл разговора, который вели между собой немецкие коллеги, и предупредил их об этом. Они были удивлены так же, как и я сам.

С ответным визитом в МГУ приезжали сотрудники из Дрезденского университета, но крепкие связи с ним не установились. Они возникли позднее, с участием МГРИ, между МГУ и Фрайбергской горной Академией (где в свое время обучался М. В. Ломоносов). Профессор Ройтер и его сотрудники принимали участие в коллективной разработке методики инженерно-геологического картирования крупных городов Европы. Над этой темой совместно работали ученые инженер-геологи из разных стран, в том числе из Польши (проф. Витольд Ковальский и др.), Болгарии (Демерев и др.), Чехословакии (проф. Милан Матула и др.), Советского Союза (проф. Г. А. Голодковская, Г. М. Терешков, Л. В. Бахирева и др.). В результате была разработана методика картирования городских территорий. Представители ГДР взяли на себя обязательство издать эти материалы, но, к сожалению, это обязательство не выполнили (вероятно, потому, что эти работы мы не оформили через СЭВ). Однако считаю, что они принесли большую пользу, так как в свое время способствовали установлению прочных рабочих контактов между советскими, польскими, чехословацкими, болгарскими, немецкими и отчасти венгерскими инженер-геологами. И в настоящее время продолжается совершенствование методики инженерно-геологического изучения крупных городов, в первую очередь Москвы. В эти работы большой вклад внесла проф. Г. А. Голодковская и ее ученики, Л. В. Бахирева и др.

В последнее время большое значение придается вопросам экологии при изучении инженерно-геологических условий крупных городов. Эти исследования проходят под общим руководством академика В. И. Осипова.

Однако настоящие связи международного характера в области инженерной геологии возникли после возникновения МАИГ (Международной ассоциации инженер-геологов).

МАИГ зародилась на Международном геологическом конгрессе, проходившем в Индии в 1968 г. Среди ученых, объявивших о необходимости создания МАИГ, был и профессор М. Арну, возглавлявший лабораторию инженерной геологии в высшем учебном заведении Франции «Эколь де мин».

Первую информацию по этому вопросу я получил от профессора МГУ, заведующего кафедрой исторической геологии и геологии СССР профессора А. А. Богданова, за что я ему очень благодарен. Владея свободно французским языком, Алексей Алексеевич помог мне познакомиться с М. Арну в его лаборатории, расположенной в районе Люксембургского парка. В лаборатории М. Арну уже применялись математические методы в инженерной геологии. На годичную стажировку во Францию для освоения математических методов был командирован Е. Н. Коломенский (МГУ), знавший французский язык. Со временем он стал крупным специалистом в этой области и перенес математические методы на кафедру грунтоведения и инженерной геологии МГУ, защитил докторскую диссертацию по этой тематике и стал обучать студентов и сотрудников кафедры, занял должность профессора, зав. лабораторией математических методов исследований на кафедре. Большое значение для меня имело знакомство с самим проф. М. Арну. У нас установились дружеские отношения. Арну и другие ученые, члены МАИГ, выступали с лекциями по актуальной тематике в МГУ, а я и мои коллеги выезжали за рубеж для чтения лекций по своим исследованиям.

Свыше 100 советских ученых оформили свое членство в МАИГ и принимали

активное участие в различных международных мероприятиях. Мои коллеги доверили мне возглавить советскую группу в МАИГ, и я был избран членом совета МАИГ, а в 1978 г., на конференции в Мадриде — президентом МАИГ. Это была обоюдная ошибка моих коллег из других стран и моя тоже. Я не знал официальных языков (английского и французского) и вынужден был постоянно иметь двух переводчиков, английского и французского, что затрудняло всю работу. Это были четыре самых тяжелых года в моей жизни.

В 1982 г. я был переизбран на конференции, проходившей в Индии, в Нью-Дели. Можно было уделять больше внимания работе в других направлениях, прежде всего укреплению связей с учеными Японии и Китая.

Мне удалось, будучи в Токио на конференции МАУ в 1960 г., подписать договор между МГУ и крупнейшим японским университетом «Васедо» о ежегодном обмене специалистами (по одному профессору и аспиранту). Благодаря этому договору Ю. Б. Осипов после стажировки в Японии смог усовершенствовать методику исследования грунтов в инженерно-геологических целях. Полученные результаты он использовал в своей работе, в частности при подготовке докторской диссертации.

Еще большее значение имели связи с китайскими учеными. До революции в Китае все инженерно-геологические исследования проводили иностранные частные фирмы, передавая китайским организациям лишь конечные результаты своих работ. В Китае понимали, что для большого строительства надо иметь своих специалистов. Поэтому моя книга «Общее грунтоведение», изданная в 1952 г., была переведена на китайский язык, а в Советский Союз, главным образом в МГУ, были направлены для обучения китайские студенты. Только на нашу кафедру грунтоведения прибыло 8 человек в один прием. Все они показали большую работоспособность при изучении и русского языка, и специальных предметов. Наша кафедра смогла подготовить их к 1958 г. для самостоятельной работы в совместной советско-китайской экспедиции в качестве начальников тематических отрядов. С этой работой они успешно справились. У меня была дипломница У Сяолинь — девушка с длинными косами, она вышла замуж, тоже за воспитанника МГУ Ту Байляна. Ни это событие, ни рождение сыновей не помешали ей вести самостоятельную работу: она стала зам. директора по науке Института гляциологии Китая. Недавно я получил от нее письмо с фотографией. Около огромной глыбы льда сняты профессор, научный руководитель от Китая У Сяолинь со своим американским аспирантом, работающие в составе одного из отрядов международной экспедиции в Канаде. На фотографии трогательная надпись, посвященная мне, ее учителю. Вообще же надо сказать, что многие из наших учеников стали известными учеными.

Я сам дважды был в Китае по приглашению своих коллег и Правительства КНР. Первый раз — в начале 50-х годов. Министерство геологии собрало тогда большую аудиторию, многие из присутствующих впервые услышали термины «грунтоведение», «инженерная геология», основные положения этих двух дисциплин.

Показывали мне китайские коллеги строительство плотины Сан-Мин-ся на р. Хуанхе. Река разработала глубокую каньонообразную долину в лёссовых толщах, которую решено было перекрыть высокой плотиной также из лёссовых пород. Меня смущало то обстоятельство, что такая плотина долго не простоят. Я свои сомнения высказал китайским коллегам, но они ссылались на наш Гидропроект. На всякий случай я решил написать свои соображения и передал их китайским коллегам.

По возвращении в Пекин мы поехали к уже построенному водохранилищу «Гуантин». Картина была печальная, та, которая рисовалась мне для Сан-Мин-ся. При тихой погоде лёссовые откосы водохранилища с шумом обрушивались в воду, потому что она подпитывала основание откосов. На вопрос китайских коллег о том, что можно сделать, я мог дать только один ответ: «Обратитесь к фито-

мелиораторам. А в общем все решит величина угла естественного откоса, надо хотят ее определить».

Первая поездка в Китай оставила тяжелое впечатление. Вторая была в 1958 г., когда мне пришлось возглавить советско-китайскую экспедицию по комплексному картированию верховьев Амура, Шилки и Аргуни. Вместе с геологами работали географы, почвоведы и другие ученые. Китайские студенты получили возможность делать дипломные работы, решая конкретные вопросы для производственных организаций своей страны. Мне пришлось докладывать итоги работ первого года (как полевых, так уже и камеральных) на коллегии Министерства геологии Китая. Было вынесено положительное решение — продолжить работы. Но тут «помешала» политика: по указанию Н. С. Хрущева все советские специалисты были отзваны из Китая, а наши китайские ученики, защитив дипломные работы (или не успевшие их защитить), были отправлены на свою родину. Совместная экспедиция по Верхнему Амуру была ликвидирована. Ее советская часть была направлена на изучение Западной Сибири, а несколько позже на инженерно-геологическое изучение «Нечерноземья Европейской части СССР». К этому же времени можно отнести завершение работ и издание 8-томной монографии «Инженерная геология СССР».

Американские ученые, руководители исследований в США проф. Вайс и проф. Шустер, просили меня прислать им экземпляр этой монографии. В ответ мы получили их положительный отзыв, в котором содержались такие слова: «Вы показали нам, по какому пути должна развиваться инженерная геология». Может быть, это даже оказало положительное влияние на присуждение основным авторам работы Ленинской премии — в то время высшей награды за научные исследования, присуждаемой правительством страны.

В последние годы одна из моих учениц Т. П. Куприна ряд лет работает в одном из колледжей США и обучает студентов, как установить влияние микроорганизмов на грунты и протекающие в них процессы. Это очень важное направление экологического характера в инженерной геологии.

Надо сказать, что за последнее время, несмотря на то, что я был избран почетным доктором университета им. Каменского в Братиславе и почетным геологом Варшавского университета, несколько ослабли связи между учеными нашей страны и других стран; дорогими стали почтовые расходы, во много раз подорожали все виды транспорта. РАН и МГУ не могут командировать своих ученых за рубеж, теперь уже не по политическим, а по экономическим причинам.

Надо считать это явление времененным, так как изоляция советских ученых от их коллег в других странах принесет стране большой вред. Я считал своим долгом еще раз напомнить нашим руководителям страны и науки об этом бесспорном факте.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Авторы, направляющие статьи и заметки в журнал «ГЕОЭКОЛОГИЯ. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология», должны соблюдать следующие правила:

1. Работа должна содержать оригинальный материал исследований авторов, ранее нигде не опубликованный.

2. При представлении экспериментальных работ редакция считает желательным следующее их построение: введение, описание метода (методика исследований), результаты и их обсуждение, выводы. Все единицы в статьях по системе «СИ».

3. Работа представляется в окончательно подготовленном для печати виде (рукописные вставки не допускаются). Объем статьи не должен превышать 24 страниц машинописного текста.

4. Рукописи должны быть напечатаны на машинке с нормальным шрифтом через два интервала, с оставлением полей с левой стороны (3—4 см).

Страницы рукописи должны быть пронумерованы, включая таблицы. (Каждая таблица печатается на отдельной странице.) Рукопись, а также рисунки, фотографии и сопровождающие работу документы представляются в двух экземплярах.

5. На первой странице должны быть напечатаны: фамилия автора и инициалы; заглавие статьи; аннотация и далее текст статьи.

6. Во избежание недоразумений и ошибок следует делать ясное различие между прописными и строчными буквами. Прописные буквы необходимо подчеркивать двумя черточками снизу (например, S), а строчные — двумя черточками сверху (например, v). Нужно делать различие между буквой O (большой), o (малой) и 0 (нулем). Буквы O и o помечаются двумя черточками, а нуль подчеркивается снизу квадратной скобкой 0 .

Особое внимание должно быть обращено на аккуратное написание и четкое разграничение индексов и показателей степени. Надстрочные знаки нужно отчеркивать (в обоих случаях простым карандашом) дугой ^, а подстрочные — дугой ~, греческие буквы должны подчеркиваться красным карандашом.

7. Сокращения слов, кроме общеупотребительных (например, и т. д. и т. п., 1 м, 2 кг), не допускаются.

8. В конце статьи после списка литературы указывается учреждение, в котором выполнена работа. В списке включаются только те работы, на которые есть ссылки в тексте. Работы в списке литературы нумеруются. Фамилии авторов располагаются по алфавиту сначала русскому, а затем латинскому. В списке литературы приводятся следующие данные: фамилия и инициалы автора, название работы; далее для журналов: название журнала (в принятом сокращении), год, том, выпуск, страница, а для книг — заглавие (обязательно полное), место издания, издательство, год и страница. Если статья из книги, обязательно следует указывать полное название книги.

9. Ссылки на литературу в тексте даются в скобках, где указывается порядковый номер библиографической ссылки и страница, если она необходима: [5, с. 80].

10. Иностранные фамилии в тексте приводятся в русской транскрипции, например: «по данным Р. Смита [5]». В русской транскрипции дают названия зарубежных месторождений, географических пунктов и пр.

11. Рисунки должны быть представлены отдельно от рукописи (в двух экземплярах) и ни в коем случае не приклеиваться к оригиналам. Рисунки должны быть пронумерованы и на обороте каждого из них подписываются фамилия автора, название статьи, а для фотографий указывается «верх», «низ». Фотографии принимаются только на глянцевой бумаге и подписываются только карандашом. Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подписях. Список подписей к рисункам прилагается на отдельном листе (не дублирующимся в тексте). В подрисуночной подписи не допускается воспроизведение небуквенных знаков (кружков, треугольников и т. п.), использованных на рисунке.

На первом экземпляре фотографий микроструктур (в нижнем правом углу)дается масштабная шкала белой наклейки с указанным на ней масштабом съемки. Второй экземпляр фотографий должен оставаться чистым. На полях рукописи должны быть указаны места помещения рисунков и таблиц, а в тексте сделаны ссылки на них.

12. Все рисунки представляются четко выполненными и пригодными для окончательного перечерчивания. Карты должны иметь минимальное количество названий различных пунктов, необходимых для понимания текста.

Геологические колонки принимаются без описания литологического состава пород. Последние даются в условных обозначениях (на чистом поле рисунка, а текстовая часть в подрисуночной подписи).

13. Редакция обращает особое внимание на то, что подготовленный к набору машинописный текст статей и рисунки подписываются автором в печать, и корректура автором не высылается.

14. Редакция сохраняет за собой право сокращать статьи и подвергать их, если это необходимо, литературной правке.

15. В случае возвращения автору статьи для дальнейшей доработки дата поступления считается с момента получения редакцией окончательного текста.

16. К рукописи обязательно должны быть приложены: точный адрес, телефон, фамилия, имя и отчество автора.

17. Гонорар авторам не выплачивается. Авторам предоставляется 25 оттисков их статей бесплатно.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
академик РАН
В. И. ОСИПОВ

Зам. главного редактора
доктор геолого-минералогических наук
А. А. ВАРГА

Ответственный секретарь
кандидат геолого-минералогических наук
Н. А. РУМЯНЦЕВА

Доктор наук,
Горно-геологическая академия (Болгария)
К. АНГЕЛОВ

Доктор геолого-минералогических наук
В. В. БАУЛИН

Доктор геолого-минералогических наук
С. Д. ВОРОНКЕВИЧ

Доктор наук,
Геологический институт АН Китая
ВАН-СЫ ЦЗИНЬ

Доктор наук, Ливерпульская лаборатория
Калифорнийского университета (США)
П. ВИТЕРСПУН

Доктор наук, Карлтонский университет
(Канада)
П. ВИЛЬЯМС

Доктор геолого-минералогических наук
Э. Д. ЕРШОВ

Доктор технических наук
Г. А. МАРКОВ

Доктор геолого-минералогических наук
И. П. ЗЕЛИНСКИЙ

Доктор наук,
Геологическая служба ФРГ
М. ЛАНГЕР

Член-корреспондент РАН
В. А. МИРОНЕНКО

Доктор геолого-минералогических наук
И. А. ПАРАБУЧЕВ

Доктор геолого-минералогических наук
Е. М. ПАШКИН

Член-корреспондент РАН
Е. В. ПИННЕКЕР

Академик РАН
Е. М. СЕРГЕЕВ

Доктор наук, Институт низких температур
университета Хокайдо (Япония)
М. ФУКУДА

Доктор геолого-минералогических наук
В. М. ШВЕЦ

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Издательство "Наука"
обращает ваше внимание на следующие книги:

Гридин В.И., Дмитриевский А.Н. Системно-аэро-
космическое изучение нефтегазоносных территорий. – М.: Наука,
1994. – 22,3 л. (п)

Впервые в отечественной литературе обобщен опыт системно-
аэрокосмического изучения нефтегазоносных территорий.

Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирова-
ние. Опыт и результаты. – М.: Наука, 1994. – 24,4 л. (п)

Систематизированы опыт и результаты работ методом верти-
кального сейсмического профилирования (ВСП), накопленные в на-
шей стране и за рубежом.

Динамические процессы в геофизической среде. – М.: Наука,
1994. – 19,3 л. (о)

Рассмотрены геофизические проявления медленно протекающих
деформационных процессов в атмосфере с временными масштаба-
ми от нескольких месяцев до десятков лет.

Адрес редакции:

103717, Москва, Подсосенский пер., д. 21

Телефон: 916-23-18

Заведующая редакцией А. А. Мазаева

Технический редактор Н. И. Демидова

Сдано в набор 23.12.94

Подписано к печати 23.01.95

Формат бумаги 70×100^{1/16}

Офсетная печать

Усл. печ. л. 11,7 Усл. кр.-отт. 8,4 тыс.

Уч.-изд. л. 14,2 Бум. л. 4,5

Тираж 700 экз. Зак. 2087

По всем вопросам приобретения книг просим обращаться
в Торговую фирму "Академкнига" по адресу:

103624, ГСП, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10.

Тел. торгового отдела: 923-72-84.

3200 р.
кatalogная цена

1500 р.
Индекс 70393

Уважаемые подписчики!

Журналы Российской академии наук можно выписать в любом почтовом отделении России по каталогу Издательства "ИЗВЕСТИЯ".

Обращаем Ваше внимание!

Подписку можно оформить и непосредственно в редакции журнала с любого очередного номера. Это избавит Вас от услуг почтового ведомства, связанных с ними неудобств и, главное, от значительной части расходов: цены редакционной подписки существенно ниже! К тому же, вышедший номер Вы сможете получить в редакции сразу же после выхода его из печати.

Пользуйтесь предоставленной Вам возможностью льготной редакционной подписки!



«НАУКА»