

ISSN 0869-7803

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГЕО ЭКОЛОГИЯ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ
ГИДРОГЕОЛОГИЯ
ГЕОКРИОЛОГИЯ

4

1996

ГЕОЭКОЛОГИЯ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1979 ГОДА

(до 1993 г. назывался «Инженерная геология»)

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

4 • 1996

июль — август

МОСКВА «НАУКА»

СОДЕРЖАНИЕ

Джамалов Р. Г., Кричевец Г. Н., Лукьянов Л. С. Загрязнение подземных вод тяжелыми неводными жидкостями	3
Мамаев Ю. А. Методологические аспекты комплексной оценки опасности природных процессов и явлений	17
Функционирование природных и природно-технических систем	
Мельников Н. Н., Козырев А. А., Ловчиков А. В., Решетняк С. П. Геодинамический мониторинг при отработке месторождений Кольского полуострова	29
Карнаухова Г. А. Влияние природно-техногенных факторов на состав вод Братского водохранилища	41
Геоэкологические проблемы захоронения и утилизации отходов	
Рыжов Б. И., Богатырев Б. А., Шикина Н. Д. Сорбция стронция и цезия красными шламами и возможное использование их при захоронении РАО	50
Степановский С. В., Юдинцев С. В., Никонов Б. С., Омельяненко Б. И. Изучение материала СИНРОК	58
Грунтоведение	
Розаев А. Е., Горбацевич Ф. Ф. Упруго-анизотропные свойства пород по разрезу Воротиловской глубокой скважины (ВГС)	75
Природные и природно-техногенные процессы и явления	
Зеркаль О. В., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л. Влияние обводнения массива лёссовых пород на устойчивость склонов	87
Методы и методика исследований	
Решетнева Т. Г., Чистов С. В. Методика создания информационно-картографической базы данных инженерно-геологических условий полуострова Ямал	95

Калачев В. Я. Несовершенство расчетной формулы определения плотности твердой компоненты незасоленных глинистых грунтов пикнометрическим методом (по ГОСТу 5180-84) 102

Хроника

Международная научная конференция «Инженерная геология сегодня и завтра»	108
Научный семинар «Качество геологической информации»	109

Люди науки

Памяти Валентина Михайловича Гольдберга	111
---	-----

CONTENTS

Dzhamalov R. G., Krichevets G. N., and Luk'yanov L. S. Ground-water contamination with heavy nonaqueous liquids	3
Mamaev Yu. A. Methodological aspects of combined assessment of natural hazards	17

Functioning of Natural and Natural Technical Systems

Mel'nikov N. N., Kozyrev A. A., Lovchikov A. V., Reshetnyak S. P. The geodynamic monitoring in exploiting deposits of the Kola Peninsula	29
Karnaukhova G. A. Natural anthropogenic impact on the water composition of Bratsk reservoir	41

Geoenvironmental Problems of Waste Disposal and Utilization

Ryzhov B. I., Bogatyrev B. A., Shikina N. D. Cesium and strontium sorption by red slimes and the possible use of the latter in radioactive-waste disposal	50
Stefanovskii S. V., Yudintsev S. V., Nikonorov B. S., Omel'yanenko B. I. Studying the SYNROCK material	58

Soil and Rock Engineering

Rozzaev A. E., Gorbatshevich F. F. Elastic anisotropic properties of rocks in the crossection of Vorotilovskaya deep well	75
---	----

Natural and natural Anthropogenic Processes and Phenomena

Zerkal' O. V., Kalinin E. V., Panas'yan L. L. Influence of moistening loessial soils on the stability of slopes	87
---	----

Research Methods and Techniques

Reshetneva T. G., Chistov S. V. The techniques for compiling cartographical informational database of engineering geological conditions of the Yamal Peninsula	95
--	----

Deliberations on Specification Documents

Kalachev V. Ya. Inadequacy of the formula for calculating the solid-phase density in nonsalinized clayey soils with pycnometer (according to GOST (State Standard) 5180-84)	102
--	-----

Chronicle

The International Scientific Conference «Engineering Geology Today and Tomorrow»	108
The scientific seminar «The quality of geological information»	109

People of Science

In commemoration of Valentin Mikhailovich Gol'dberg	111
---	-----

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 624.131

© 1996 г. Р. Г. ДЖАМАЛОВ, Г. Н. КРИЧЕВЕЦ, Л. С. ЛУКЬЯНОВ

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЯЖЕЛЫМИ НЕВОДНЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

В статье характеризуются физико-химические и миграционные свойства тяжелых неводных жидкостей (ТНВЖ) — слабоизученных, но весьма токсичных загрязнителей окружающей среды и особенно подземных вод. Высокая плотность и низкая растворимость в воде позволяют ТНВЖ легко проникать через ненасыщенную зону в водоносные горизонты и служить долговременным или практически постоянным источником ухудшения качества подземных вод. Рассмотрены концептуальные модели миграции тяжелых неводных жидкостей в пористых и трещиноватых фильтрационных средах. Концептуальные модели могут служить основой для математического моделирования процессов формирования и эволюции очагов загрязнения ТНВЖ в водоносных горизонтах. Специфика ТНВЖ, особенности их накопления в фильтрационных средах требуют разработки новых методов разведки очагов загрязнения, которые должны базироваться на экспериментальном, натурном и теоретическом изучении данной проблемы.

В последние годы загрязнение подземных вод органическими химикатами стало серьезной проблемой. Источниками загрязнения являются свалки, протечки химикатов и утечки из подземных хранилищ. Наиболее часто в подземных водах обнаруживают органические хлорсодержащие растворители. По данным мониторинга подземных вод, расположенных рядом с 183 площадками для хранения опасных отходов в США, более половины наиболее часто встречающихся органических загрязнителей представлены хлорсодержащими растворителями [13]. Трихлорэтилен, дихлорметан, тетрахлорэтилен возглавляют список этих загрязнителей. Аналогичная ситуация и в Европе. В 232 скважинах, используемых как источники питьевой воды в Нидерландах, были обнаружены хлорсодержащие загрязнения в концентрации, превосходящей порог чувствительности (0,01 мкг/л), в том числе трихлорэтилен — в 67% скважин, тетрахлорид углерода — в 43% и тетрахлорэтилен — в 19% скважин.

Вероятность попадания органических хлорсодержащих растворителей в подземные воды очень велика, так как их широко производят, транспортируют, используют и при этом теряют в большом количестве во многих отраслях современного производства. В табл. 1 показаны объемы производства отдельных более плотных, чем вода органических растворителей за 1986 г. в США. Эти органические растворители по-английски называют DNAPL (dense non-aqueous phase liquids), т. е. тяжелые неводные жидкости (ТНВЖ). Неводность означает, что они образуют отдельную жидкую fazу в воде, подобно нефтяным углеводородам. В отличие от последних они плотнее воды. Даные вещества называют также плотными несмешивающимися жидкостями. Хотя они и не смешиваются с водой, однако достаточно растворимы, чтобы вызвать значительное загрязнение подземных вод.

Попав в подземные воды, хлорсодержащие растворители могут сохраняться там десятилетиями и даже столетиями. Они с большим трудом удаляются из водоносных горизонтов и поэтому представляют собой долговременный источник загрязнения подземных вод и окружающей среды в целом.

Использование, а значит, и утечка растворителей происходят не только в

Таблица 1

Производство некоторых органических растворителей в США за 1986 г. *

Соединение	Объем, тыс. т	Соединение	Объем, тыс. т
1,2-Дихлорэтан	5871	Хлороформ	191
1,1,1-Трихлорэтан	294	Тетрахлорэтилен	184
Тетрахлорид углерода	284	Трихлорэтилен	75
Хлорид метиlena	255		

* Данные Американского Химического Общества (1986 г.)

химической промышленности. Такие «чистые» отрасли, как электронная, инструментальная и аэрокосмическая, используют большое количество плотных органических растворителей. Кроме того, подобные растворители применяют не только на крупных предприятиях, но практически в каждом населенном пункте их используют в химчистках, ремонтных мастерских, фотофабриках, типографиях. Плотные органические растворители попадают в водоносные горизонты различными путями, в частности в результате протечек подземных или наземных хранилищ, распределительных трубопроводов, аварий при транспортировке, фильтрации в районе свалок и т. д.

Тяжелые органические растворители признаны в настоящее время наиболее опасными современными загрязнителями подземных вод в силу их особых физических и химических свойств. Как уже отмечалось, ТНВЖ не смешиваются с водой и тяжелее ее. Кроме того, большинство растворителей имеет вязкость меньшую, чем у воды (см. табл. 2). Сочетание низкой растворимости, высокой плотности и низкой вязкости позволяет ТНВЖ легко преодолевать ненасыщенную и насыщенную зоны в виде не смешивающейся с водой жидкости. Способность ТНВЖ «проналиваться» через насыщенную зону отличает их от нефтяных углеводородов, которые, как правило, создают пленку или слой на поверхности подземных вод из-за своей малой плотности.

Многие другие органические вещества, такие как галогенированные бензины, полихлоридные бифенилы, некоторые пестициды, каменноугольная смола и креозот, также являются ТНВЖ. По свойствам и поведению в подземных условиях эти ТНВЖ подобны хлорсодержащим растворителям, хотя в подземных водах они встречаются намного реже, так как их используют реже и в меньших количествах. Кроме того, они менее растворимы и намного менее подвижны в воде, чем плотные хлорсодержащие органические растворители.

Концентрация органических растворителей в питьевой воде порядка 1 мкг/л, и даже меньше, представляет опасность для здоровья населения. Считают, что трихлорид углерода, хлороформ и трихлорэтилен обладают концергентными свойствами, а повышенное количество таких соединений, как тетрахлорид углерода и тетрахлорид этилена, вызывает разрушение печени и почек. Стандарты питьевой воды для многих плотных растворителей столь жестки, что даже относительно малые их количества, попавшие под землю, могут существенно ухудшать качество подземных вод.

Хотя ТНВЖ не смешиваются с водой и отличаются сравнительно низкой растворимостью в воде (типичные значения от 100 до 5000 мг/л), их растворимость часто на много порядков превосходит соответствующие нормы для питьевой воды. В табл. 2 приведены данные о растворимости некоторых хлорсодержащих растворителей и их предельно допустимых концентрациях, установленных Агентством по охране окружающей среды США.

В неконтролируемых источниках питьевой воды, таких как частные колодцы, хлорсодержащие растворители потенциально более опасны, чем многие другие

Таблица 2

Физические и химические свойства некоторых плотных органических растворителей и их ПДК для питьевых вод (при температуре 20° С)

Растворитель	Плотность, г/см ³	Вязкость, СП	Упругость пара, мм	Плотность относительно воздуха	Растворимость, мг/л	ПДК, мг/л
1,2-Дихлорэтан	1,26	0,84	61	1,19	8690	0,005
1,1,1-Трихлорэтан	1,35	0,84	100	1,47	720	0,2
Тетрахлорид углерода	1,59	0,97	90	1,51	785	0,005
Хлорид метиlena	1,33	0,44	349	1,89	20 000	0,01
Хлороформ	1,49	0,56	151	1,62	8200	0,1
Тетрахлорэтилен	1,63	0,90	14	1,09	200	0,005
Трихлорэтилен	1,46	0,57	58	1,27	1100	0,005
Вода	1,00	1,12	18	—	—	—

органические соединения. Ароматические углеводороды (бензол, толуол, этилбензол, ксиолы) в концентрациях, близких к предельно допустимым, вполне могут быть обнаружены в воде благодаря измененному вкусу и запаху. Для большинства же хлорсодержащих растворителей концентрации, при которых их присутствие становится заметным по запаху, намного превосходят соответствующие нормы для питьевой воды.

До 80-х годов мало кто в мире придавал значение ТНВЖ как опасному источнику загрязнения подземных вод. Первым признал важность ТНВЖ Фридрих Швилле, который в Федеральном институте гидрологии в г. Кобленце (ФРГ) с 60-х годов исследовал поведение растворителей в подземных водах. В начале 70-х годов Ф. Швилле разработал концептуальные модели поведения ТНВЖ под землей. Эти концепции были основаны на исследованиях поведения нефтяных углеводородов (менее плотных, чем вода) в почвах и породах.

Ф. Швилле продолжил свои исследования, изучил поведение хлорсодержащих растворителей, проводил лабораторные наблюдения за проникновением ТНВЖ в насыщенные и не насыщенные водой пески и растворением ТНВЖ в подземных водах. В 1981 г. появилась его первая публикация о концепции вертикальной миграции растворителей плотнее воды в насыщенной зоне. Полный отчет об исследованиях, озаглавленный «Летучие хлорсодержащие углеводороды в пористой и трещиноватой среде — модельные эксперименты», опубликован в 1984 г. Достижения Ф. Швилле были признаны научной общественностью.

В 1984 г. С. Феенстра [4] и Дж. А. Черри [1] описали общее поведение ТНВЖ под землей. В этих статьях был введен в употребление термин DNAPL (ТНВЖ), отличающихся более плотные, чем вода, NAPL (НВЖ) от LNAPL (ЛНВЖ) — более легких, чем вода, нефтяных углеводородов. Дальнейшее развитие концепций поведения ТНВЖ были даны Ф. Швилле [14], Д. Вильямом [15], Феенстра [5], С. Феенстра [6], Д. Черри [2], Хантоном и др. [9].

Хотя загрязнения тяжелыми органическими растворителями представляют собой серьезную проблему, в открытой печати насчитываются очень мало публикаций о подобных случаях. До недавнего времени число конкретных исследований в этой области было невелико. Несмотря на это, обзор данных по большому числу промышленных объектов и площадей захоронений отходов позволяет заключить, что ТНВЖ является одним из основных современных загрязнителей подземных вод, в большинстве случаев действующим, но нераспознанным. Загрязнения подземных вод растворителями, обнаруженные в последние годы, были вызваны протечками ТНВЖ в течение двух-трех десятилетий после второй мировой войны. В это время быстро развивались отрасли, использующие растворители,

а обычная практика их хранения и применения не считалась с охраной окружающей среды. До 80-х годов ни в контролирующих органах, ни в промышленности, ни в исследовательских кругах не осознавалась огромная опасность хлорсодержащих растворителей как долговременного загрязнителя подземных вод. Столь позднее признание существования этой проблемы связано со специфическими свойствами ТНВЖ.

Физические основы движения и распределения ТНВЖ в фильтрационных средах

Миграция растворителей в фильтрационной среде может быть описана с использованием тех же общих принципов течения многофазной жидкости, применимых к нефтяным углеводородам, хотя детали поведения ТНВЖ весьма отличны. Следует принимать во внимание взаимодействие между ТНВЖ, водой и воздухом в ненасыщенной зоне и ТНВЖ и водой в насыщенной зоне. Для наших целей удобно рассмотреть три различных, но взаимосвязанных аспекта миграции ТНВЖ через фильтрационную среду: условия проникновения, условия течения и их окончательное статическое распределение после прекращения течения.

Проникновение ТНВЖ в фильтрационную среду определяется прежде всего капиллярными силами, возникающими из-за поверхностного натяжения между двумя или более фазами. Кроме того, смачиваемость в системе вода — ТНВЖ — скелет породы будет влиять на условия проникновения ТНВЖ в среду с данной проницаемостью. В связи с тем, что смачиваемость заданной системы является функцией химического состава поверхности твердой породы, подземных вод и самой ТНВЖ, причем каждое из свойств в свою очередь может сильно меняться от точки к точке, в реальных условиях встречаются сложные соотношения смачиваемости. Так, если ТНВЖ несмачивающая, то вода будет обволакивать зерна породы и занимать меньшие поры и стыки пор. Распространение ТНВЖ будет ограничено крупными порами с широкими входами. В ситуации же, когда ТНВЖ смачивающая, положение обратное — ТНВЖ обволакивает зерна породы и занимает меньшие поры (рис. 1).

Проникновение несмачивающей ТНВЖ в породу будет затруднено капиллярными силами. Силы, определяющие движение ТНВЖ, являются функцией ее плотности и давления, возникающего в результате ее накопления над поверхностью. Эти движущие силы должны преодолеть сопротивление капиллярных сил фильтрационной среды. При движении ТНВЖ деформируется и проходит из одних относительно широких частей пор в другие через узкие стыки. Давление, необходимое для этого, называемое входным давлением, пропорционально поверхностному натяжению между ТНВЖ и водой и обратно пропорционально размеру стыков. Следовательно, проникновение ТНВЖ в мелкозернистую поровую среду или в трещиноватую среду с малым раскрытием трещин (т. е. среды с низкой проницаемостью) потребует больших движущих сил для преодоления высоких входных давлений этих пород. Поэтому слои с низкой проницаемостью могут служить барьерами для миграции ТНВЖ. Если поверхностное натяжение мало, например в результате присутствия в подземных водах поверхностно-активных веществ, то ТНВЖ может проникнуть в мелкозернистые среды. В случае смачивающей ТНВЖ капиллярные силы усиливают проникновение ТНВЖ в мелкозернистую среду.

Скорость течения ТНВЖ через фильтрационную среду зависит от плотности и вязкости ТНВЖ, давления, вызывающего ее миграцию, проницаемости среды и степени ее насыщенности ТНВЖ. Более высокие скорости миграции ТНВЖ будут определяться большей проницаемостью среды, ее высокой насыщенностью ТНВЖ с большей плотностью и меньшей вязкостью. Большинство хлорсодержащих растворителей имеет плотность, значительно превосходящую плотность воды, а вязкость — меньшую, поэтому при условии высокой насыщенности ТНВЖ ее миграция может происходить со скоростью, сравнимой или превосходящей скорость фильтрации подземных вод.

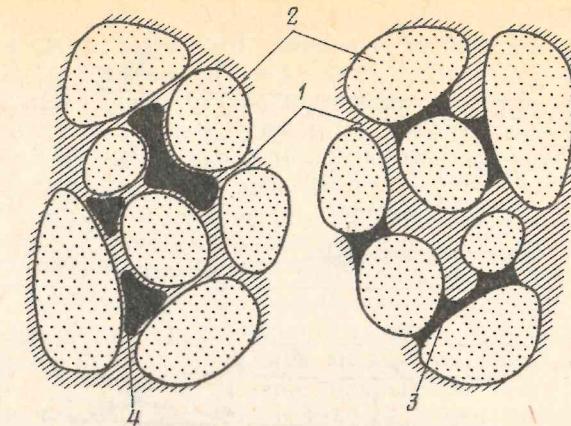


Рис. 1. Распределение несмачивающей и смачивающей ТНВЖ в водонасыщенных песках: 1 — вода; 2 — порода; 3 — смачивающая ТНВЖ; 4 — несмачивающая ТНВЖ

В фильтрационных средах движение ТНВЖ происходит преимущественно прерывистым фронтом. После протечки ТНВЖ обычно скапливается в нижних горизонтах почво-грунтов в виде несвязанных между собой включений, занимающих отдельные поры, или их объединения, т. е. образуется зона залегания или распространения загрязнителя.

Концептуальные модели распространения ТНВЖ в водоносных горизонтах

Основываясь на лабораторных экспериментах, моделировании и полевых наблюдениях в Северной Америке, можно развить несколько общих концептуальных моделей распространения ТНВЖ. В этих моделях рассматриваются объемы ТНВЖ в подземных горизонтах, соответствующие реальным протечкам, при условии их проникновения в гидросферу через ненасыщенную и насыщенную зоны.

ТНВЖ в ненасыщенной зоне. Рисунок, 2, а иллюстрирует случай относительно малой протечки, при которой вся ТНВЖ задерживается в ненасыщенной зоне, поскольку ее объем не превосходит емкость ненасыщенной зоны. Для данного объема ТНВЖ глубина проникновения будет зависеть от величины площади, на которой случилась протечка, и от ее расхода. Два эксперимента в полевых условиях по проникновению тетрахлорэтилена в ненасыщенную зону, сложенную слабостратифицированным песком, были выполнены Поулсеном и Кюпером (Poulsen and Kueper). В первом случае 6 л тетрахлорэтилена мгновенно разливались на голой земной поверхности площадью 0,1 м². Тетрахлорэтилен проник до глубины 2,15 м. Во втором — 6 л тетрахлорэтилена медленно выливались в течение 100 мин на площади 1 см². Тетрахлорэтилен из этой протечки проник до уровня подземных вод на глубине 3,3 м. При том же объеме протечки проникновение растворителя было глубже при малом расходе точечного источника. В обоих случаях миграция ТНВЖ сильно зависела от плотности песка. Растворитель мигрирует предпочтительно вдоль слоев крупнозернистого песка, не проникая в мелкозернистые. Влияние мелкомасштабной слоистости на миграцию максимально, по-видимому, при медленной протечке.

Из лабораторных экспериментов с колонкой однородного песка следует, что остаточное содержание растворителей изменяется в пределах от 3 до 30 л/м³, что составляет от 1 до 10% порового пространства по данным Ф. Швилле [14]. Для ненасыщенных слоистых песков, рассмотренных Поулсеном и Кюпером в ходе полевых экспериментов, остаточное содержание ТНВЖ составляло от 2 до 18% порового

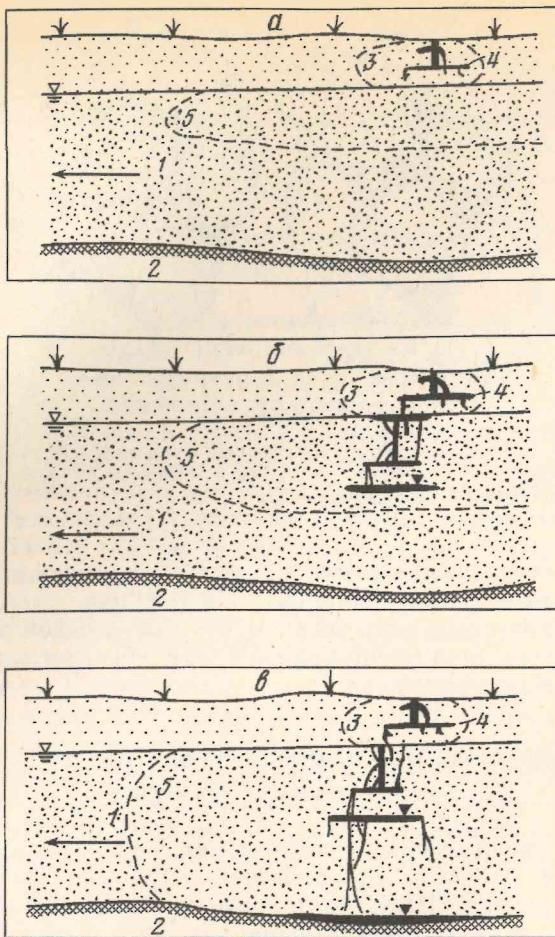


Рис. 2. Принципиальные схемы миграции и скопления ТНВЖ:
а — в зоне аэрации, б — в верхней части однородного водоносного горизонта, в — по всему разрезу однородной фильтрационной среды. 1 — водоносный горизонт; 2 — водоупор; 3 — ореол паров; 4 — скопление ТНВЖ; 5 — ореол раствора

пространства. Для оценки опасности загрязнения подземных вод желательно прогнозировать глубину проникновения ТНВЖ, основываясь на величине протечки и остаточном содержании растворителя. Однако из-за влияния неоднородности фильтрационной среды на миграцию ТНВЖ и, следовательно, на распределение ее остатков такие оценки глубины проникновения весьма ненадежны. Согласно результатам Поулсена и Кюпера, малые утечки — порядка десятков литров — проникают на глубину в несколько метров. Следовательно, значительное загрязнение подземных вод хлорсодержащими растворителями может произойти даже в случаях их обычного хранения и штатных операций с ними, при которых происходят только малые ежедневные или иные обычные потери растворителей.

Большинство плотных органических растворителей обладает высоким давлением паров, поэтому в ненасыщенной зоне вокруг источника ТНВЖ в поровом воздухе развивается ореол паров растворителя. Моделирование переноса паров, выполненное Мендозой и Мак-Алари [12] и Мендозой и Фриндом в 1990 г. [11] показывает, что диффузия летучих паров от источников ТНВЖ может сформировать ореолы паров в ненасыщенной зоне, которые распространяются на десятки метров и более от источника за период от недель до месяцев. Для

соединений с высоким давлением паров и с относительной плотностью, значительно превосходящей плотность воздуха, в средах с высокой проницаемостью может происходить конвективное погружение плотных паров через ненасыщенную зону до грунтовых вод. Б. Хьюз и др., в 1990 г. подтвердил результаты моделирования полевыми экспериментами с переносом паров трихлорэтилена в ненасыщенной зоне песчаного горизонта [8].

Согласно концептуальной модели, показанной на рис. 2, а, загрязнение подземных вод происходит за счет воды, фильтрующейся через ореол паров и зону остаточной ТНВЖ и переносящей растворенный ею загрязнитель до уровня подземных вод. По мере поступления инфильтрационных вод в насыщенной зоне развивается неглубокий ореол растворенных загрязнителей. Даже при отсутствии прямой инфильтрации за счет колебания уровня грунтовых вод происходит их загрязнение, если амплитуда колебаний захватывает зону, содержащую пары растворителя. Сама диффузия паров ТНВЖ в ненасыщенной зоне может привести к загрязнению подземных вод даже без инфильтрационного питания и существенного колебания уровней грунтовых вод. Полевые эксперименты, проведенные Б. Хьюзом и др. в 1990 г. [8], показывают, что за счет паров растворителя в ненасыщенной зоне за период порядка нескольких недель могут образоваться значительные ореолы загрязнения в подземных водах. Ореолы могут иметь высокую концентрацию загрязнителя, но мощность их по вертикали обычно не превышает первых десятков сантиметров.

ТНВЖ в насыщенной зоне. Рассмотрим случай, когда объем протечки ТНВЖ достаточно велик для проникновения в насыщенную зону, но недостаточен для достижения подошвы водоносного горизонта (рис. 2, б). Поток подземных вод не оказывает существенного влияния на продвижение ТНВЖ в насыщенной зоне. Ф. Швилле показал, что на вертикальное проникновение трихлорэтилена и тетрахлорэтилена в крупно- и среднезернистые пески практически не отразилось наличие горизонтального потока подземных вод со скоростью 14 м/сут. Миграция ТНВЖ в насыщенной зоне также сильно зависит от неоднородности среды. В мелкозернистых слоях скорость миграции ТНВЖ снижается, что может послужить причиной образования слоев и залежей ТНВЖ или отклонения ее миграции от вертикали. Боковая миграция ТНВЖ может зависеть, но не определяться направлением и величиной латерального течения подземных вод. Лабораторными исследованиями и моделированием Б. Кюпер и др. в 1989 г. и Б. Кюпер и Фринд в 1990 г. продемонстрировали это отклонение от вертикальной миграции ТНВЖ мелкозернистыми слоями.

Имеющиеся данные об остаточном содержании ТНВЖ в насыщенной зоне свидетельствуют, что оно выше, чем в ненасыщенной зоне. Содержание меняется от 5 до 50 л/м³, или от 2 до 15% порового пространства. Максимальное содержание наблюдается в мелкозернистых породах. Присутствие ТНВЖ в поровом пространстве насыщенной зоны замедляет, но не останавливает течение подземных вод. Подземные воды в этом случае растворяют некоторое количество ТНВЖ и несут далее загрязнение в растворенной фазе. В слоях или залежах ТНВЖ может занимать от 40 до 70% порового пространства. При таких величинах насыщения ТНВЖ проницаемость фильтрационной среды для движения подземных вод уменьшается на несколько порядков. В пределах этих зон скорость переноса массы загрязнителя в подземные воды существенно ниже по сравнению с участками спорадического распространения ТНВЖ. Растворение залежи может проходить в основном только вдоль ее границ, так как течение подземных вод через залежь очень слабо.

В результате растворения ТНВЖ образуется ореол загрязнения подземных вод. В лабораторных экспериментах вода в пористой среде, контактируя с ТНВЖ, быстро (от минут до часов) приобретает концентрацию растворенной в ней ТНВЖ, близкую к предельной. Однако, в полевых условиях концентрации хлорсодержащих растворителей, близкие к пределу растворимости, наблюдаются редко, за исключением зон в непосредственной близости к крупным залежам ТНВЖ.

Обычно это интерпретируется как отсутствие остатков или залежей ТНВЖ. Однако ряд фактов свидетельствует, что такая интерпретация неверна. Концентрации раствора, намного меньшие, чем предел растворимости, могут получаться благодаря следующим эффектам: разбавлению интересующих нас соединений другими соединениями, неоднородному распределению ТНВЖ по зонам остатков, слоев и залежей, разбавлению в самих скважинах и дисперсии в водоносном горизонте.

Из-за своей относительно низкой растворимости остаточные зоны и залежи хлорсодержащих растворителей исчезают из системы подземных вод весьма медленно, даже если постоянно растворяются подземными водами. Рассмотрим, например, куб песчаной породы объемом 27 м³, который содержит трихлорэтилен в виде остатков. Содержание ТНВЖ меняется внутри остаточной зоны от 0 до 15% порового пространства, а среднее содержание — 10 л/м³. Количество трихлорэтилена в этом объеме равно приблизительно 270 л. Скорость движения воды через эту зону, равная 11 м/год, характерна для песчаных водоносных горизонтов (коэффициент фильтрации 10⁻² см/с, гидравлический градиент 0,001 и пористость 0,3). Подземные воды, омывающие такую остаточную зону, будут содержать загрязнитель в концентрации, меняющейся от очень низкой до уровня растворимости в зависимости от распределения ТНВЖ. Даже если средняя концентрация трихлорэтилена в подземных водах, омывающих эту остаточную зону, была бы 10% от его растворимости (110 мг/л), что больше среднего, то потребовалось бы по крайней мере 100 лет, чтобы удалить ТНВЖ и снизить концентрацию раствора ниже ПДК для питьевой воды. Основываясь на лабораторных экспериментах, следует считать действительное время, необходимое для полного растворения ТНВЖ, значительно большим из-за того, что концентрация раствора определяется растворением, скорость которого падает со временем по мере того, как уменьшается масса ТНВЖ. Такие расчеты согласуются с полевыми наблюдениями, показывающими, что сильное загрязнение подземных вод из источников ТНВЖ продолжается десятки лет после протечки.

Если объем пролитой ТНВЖ больше удерживающей способности ненасыщенной и насыщенной зон, то некоторое ее количество сформирует залежь на подошве водоносного горизонта, или же на слабопроницаемых прослоях в водоносном горизонте (рис. 2, в). Когда удерживающий слой наклонен, ТНВЖ может двигаться вниз по уклону независимо от направления потока воды. В зависимости от объема пролитой ТНВЖ и конфигурации удерживающих слоев, загрязнение может смещаться на значительные расстояния. Скорость миграции может быть значительной в хорошо проницаемых средах. Так, лабораторные эксперименты Ф. Швилле (1988), Кюпера и др. (1989) показали, что скорости миграции тетрахлорэтилена в крупно- и среднезернистых песках достигают сантиметров в минуту при малых давлениях столба ТНВЖ.

Остаточные зоны или залежи малых размеров (несколько метров) могут содержать значительные количества ТНВЖ. Так, примерно 800 л ТНВЖ может содержаться в залежи размерами всего 3 × 3 × 0,3 м. Такое количество ТНВЖ может оказаться весьма значительным источником загрязнения, но его очень трудно обнаружить бурением. Расстояние между скважинами следует задавать намного меньше принятого при гидрогеологических исследованиях ореолов загрязнения. Следовательно, на многих промышленных объектах или участках захоронения отходов можно ожидать залежи или линзы ТНВЖ, которые не были обнаружены во время стандартных опробований, режимных наблюдений или геофизических съемок.

ТНВЖ в неоднородных фильтрационных средах. Мелкозернистые слои, такие как суглинки и глины, препятствуют миграции ТНВЖ, если только в этих слоях нет литологических окон или других нарушений их сплошности (рис. 3). Такие окна могут быть слишком малы по площади, чтобы их можно было обнаружить бурением или геофизической съемкой. Кроме того, наличие мелких нарушений обычно не фиксируется, поскольку они могут не оказывать существенного влияния на миграцию растворенных в воде традиционных загрязнителей. Однако

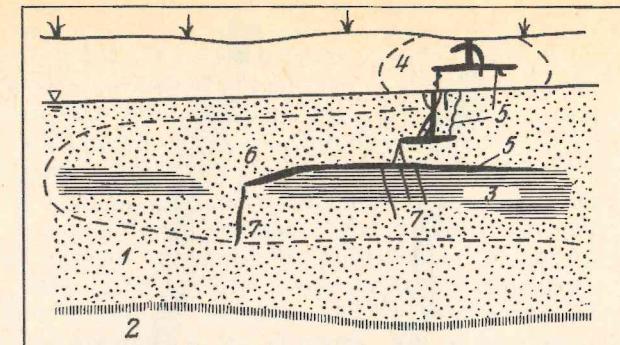


Рис. 3. Принципиальная схема миграции ТНВЖ в неоднородной фильтрационной среде: 1 — водоносный горизонт; 2 — водоупор; 3 — глинистый прослой; 4 — ореол паров; 5 — скопление ТНВЖ; 6 — ореол раствора; 7 — проникновение ТНВЖ по трещинам и окнам

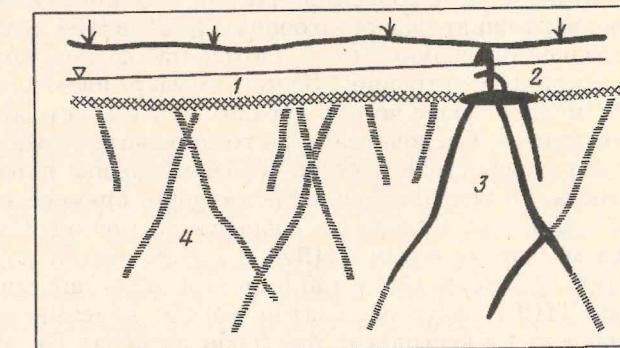
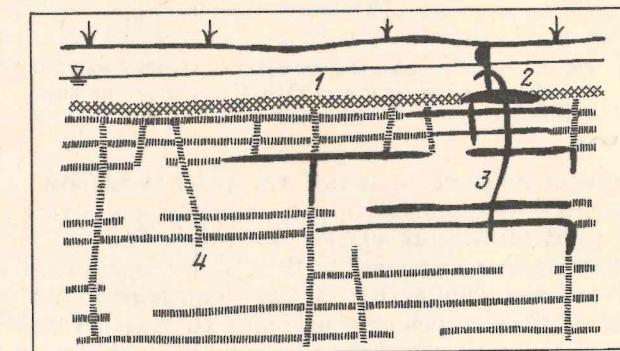


Рис. 4. Принципиальная схема миграции ТНВЖ в трещиноватых породах: 1 — выветрелые коренные породы; 2 — скопление ТНВЖ; 3 — ТНВЖ в трещинах; 4 — трещины

миграция ТНВЖ в более глубокие горизонты через эти нарушения даже в количестве нескольких миллиметров в сутки может оказывать воздействие на подземные воды, в миллионы раз большее по сравнению с обычными загрязнителями из-за высокой концентрации ТНВЖ.

Проникновение ТНВЖ ниже уровня подземных вод по «окнам» и трещинам зависит от давления, вызывающего ее миграцию, поверхностного натяжения между ТНВЖ и водой и раскрытия трещины. Согласно моделированию, проведенному Кюпером и Мак-Уортером в 1990 г., даже маломощные залежи тетрахлорэтилена

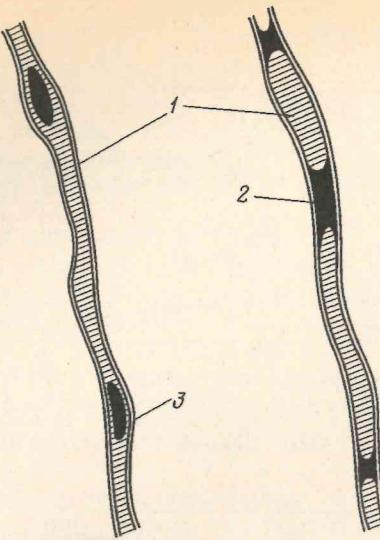


Рис. 5. Смачивающая и несмачивающая ТНВЖ в трещине:
1 — вода; 2 — смачивающая ТНВЖ; 3 — несмачивающая ТНВЖ

могут вызвать проникновение в малые трещины размером от 10 до 50 мкм. Наличие нарушений в глинистых слоях должны учитываться для водоупоров, перекрывающих и подстилающих водоносные горизонты.

ТНВЖ в трещиноватых породах. ТНВЖ могут проникать в трещиноватые породы. Структура течения ТНВЖ будет определяться в первую очередь ориентацией и взаимосвязью трещин (рис. 4). Ф. Швилле в 1988 г. в лабораторных экспериментах показал, что на поверхности трещин как выше, так и ниже уровня подземных вод удерживается мало ТНВЖ (рис. 5). Для плоских трещин размером 200 мкм он оценил верхний предел остаточной ТНВЖ в 0,05 л/м². Для трещиноватых пород со средней проводимостью, с плотностью трещин порядка единиц на 1 м² породы и с раскрытием трещин 200 мкм их удерживающая способность не превышает 0,15 л/м³, т. е. более чем на порядок меньше, чем остаточные содержания в песчаных грунтах. Следовательно, в трещиноватых средах данный объем растворителя может распространяться на гораздо большие площади и глубину, чем в пористых средах. Для сравнения, в предыдущем примере залежь, содержащая 800 л ТНВЖ, занимала в песчаном водоносном горизонте площадь 3 × 3 м при мощности 0,3 м. Тот же объем ТНВЖ в трещиноватой породе, описанной выше, содержался бы в залежи 130 × 130 м при той же мощности.

При движении ТНВЖ в трещиноватой породе максимальная глубина ее проникновения зависит от нескольких факторов, включая раскрытие трещин и связь между ними. Известно, что густота и раскрытие трещин уменьшаются с глубиной, но во многих случаях затухание трещиноватости не останавливает миграцию ТНВЖ. В связи с этим ТНВЖ проникают в трещиноватые породы на глубину нескольких сотен метров и более.

Методы моделирования нестабильности фронтов миграции ТНВЖ в поровой среде

Перемещения несмешивающихся жидкостей зависят от различий в вязкости и коэффициентах поверхностного натяжения жидкостей, а также от их плотностей. Влияние неоднородности пористой среды на движение несмешивающихся жидкостей, во всех масштабах начиная с отдельных пор и выше, значительно сильнее, чем на движение смешивающихся. Настоящий обзор ограничивается случаем

двух фаз, фильтрующихся через пористую среду, при условии выполнения закона Дарси. В качестве двух фаз могут быть избраны вода и несмешивающийся с ней загрязнитель, несмешивающийся загрязнитель и воздух, или воздух и вода. Основные концепции нестабильности фронтов движущихся жидкостей описываются в условиях однородной и неоднородной поровых сред.

Однородная поровая среда. Большая часть лабораторных экспериментов с несмешивающимися с водой жидкостями проводилась в однородной поровой среде. В этом случае важно учесть явление образования «пальцев» и соответствующим образом планировать эксперимент. Рассмотрим процесс перемещения несмешивающейся с водой жидкости. Допустим, что несмачивающая породу жидкость вытесняет смачивающую породу жидкость вертикально вниз с постоянной скоростью в однородной изотропной поровой среде. Пусть макроскопически плоская поверхность раздела двух жидкостей подвергнута малому возмущению, которое вызвано ее микроскопической неоднородностью. Если дестабилизирующие силы превосходят стабилизирующие, то из этого возмущения образуется палец. Другими словами, если давление в точке 2, находящейся в неоднородности рядом с фронтом со стороны смачивающей жидкости, больше, чем давление в точке 1, находящейся там же, но со стороны несмачивающей жидкости, то образуется палец, если нет, то возмущение сглаживается. Давления в точках 1 и 2 выражаются следующими уравнениями:

$$P_2 = P_0 + \rho_2 g dx - \mu_2 v dx / k_2, \quad (1)$$

$$P_1 = P_0 + \rho_1 g dx - \mu_1 v dx / k_1 - P_c, \quad (2)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности несмачивающей и смачивающей жидкостей; k_1 и k_2 — эффективная проводимость для жидкостей 1 и 2; μ_1 и μ_2 — динамическая вязкость несмачивающей и смачивающей жидкостей; v — скорость перемещения поверхности раздела, удовлетворяющая закону Дарси, P_c — градиент поверхностного натяжения поверхности раздела за счет ее микроскопической кривизны. Поскольку мы имеем дело с однородной средой, то можно принять, что P_c постоянно для всех точек поверхности раздела. Возмущение разовьется в палец, если выполнено условие

$$P_2 > P_1 + P_c. \quad (3)$$

Подстановка уравнений (1) и (2) в неравенство (3) дает

$$v_c > g (\rho_1 - \rho_2) / [(\mu_1 / k_1) - (\mu_2 / k_2)], \quad (4)$$

где v_c — критическая скорость, превышение которой вызывает формирование «пальца» из возмущения. Такое же уравнение выводится для случая смачивающей жидкости, вытесняющей несмачивающую жидкость. И гравитационные, и вязкие силы могут иметь как стабилизирующую, так и дестабилизирующую влияние на фронт в зависимости от соотношения плотностей, вязкостей, направлений движений и скоростей жидкостей.

В проведенном рассмотрении отсутствует анализ влияния сил поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение может иметь стабилизирующую влияние на фронт в зависимости от радиуса кривизны начального возмущения. Анализ нестабильности фронта, проведенный рядом авторов [3, 7], дал дополнительное условие, что длина волны возмущения (т. е. среднее расстояние от одного максимума возмущения до другого) должна быть больше критической:

$$\lambda_c = 2\pi / [(\mu_1 / k_1) - (\mu_2 / k_2)] (v - v_c), \quad (5)$$

где λ_c — критическая длина волны; v — скорость фронта по Дарси; σ — эффективное межфазное натяжение, вызванное работой по образованию межфазной

поверхности. Те же авторы нашли длину волны, максимально дестабилизирующую фронт:

$$\lambda_m = \lambda_c \sqrt{3}, \quad (6)$$

где λ_m — длина волны возмущений, дающая максимальную нестабильность. Эти результаты были проверены экспериментами, которые показали хорошее совпадение теории и эксперимента для начальной стадии развития пальцев.

Неоднородная поровая среда. Следует заметить, что предыдущий раздел неприложим к случаю неоднородной поровой среды. В этом случае пальцевая структура порождается продвижением жидкости в наиболее проницаемые участки поровой среды. Эксперименты показывают, что даже небольшие отклонения от однородности обесценивают модели, разработанные для однородной среды.

Если поровая среда характеризуется макроскопическими неоднородностями, сравнимыми по масштабу с критической длиной волны, то разумнее называть образующиеся предпочтительные пути не пальцами, а каналами. Распределения пор в кернах естественных горных пород обнаруживают небольшие вариации. Перемещения жидкости в неоднородной среде определяются распределением в поровой среде минимальных величин давлений, необходимых для прорыва в поры, и потенциалами напоров жидкости. Минимальные давления, необходимые для прорыва пор, определяются размерами этих пор, а потенциалы напора — плотностью, вязкостью и начальными условиями. Важность распределения давлений прорыва объясняется свойствами жидкости продвигающегося фронта. Несмачивающая жидкость должна преодолеть силы поверхностного натяжения, прежде чем она попадет в пору. Очная проводимость геологической среды вступает в действие только позади фронта, т. е. когда данный объем заполнен жидкостью.

Методы численного моделирования

Какого-либо предпочтительного метода численного моделирования движения несмешивающейся с водой жидкости не существует. Используются несколько различных подходов, отличающихся принятыми допущениями. Аналитические решения получены только для случая однородной среды при упрощающих допущениях. Из-за сильной нелинейности аналитические методы могут применяться лишь очень ограниченно.

Решение уравнений течения двухфазной жидкости. Уравнения неразрывности для течения двухфазной жидкости основаны на одновременном учете обеих фаз. Постулируя отсутствие массообмена между фазами, несжимаемость жидкостей и среды, учитывая закон Дарси, получим

$$\rho \Phi \frac{\partial S_w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{k_{ij}}{\mu_w} \left(\frac{\partial P_w}{\partial x_j} - \rho_w g \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right] = 0, \quad (7)$$

$$\Phi \frac{\partial S_{Nw}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{k_{ij} k_{Nrw}}{\mu_{Nw}} \left(\frac{\partial P_{Nw}}{\partial x_j} - \rho_{Nw} g \frac{\partial z}{\partial x_j} \right) \right] = 0, \quad (8)$$

где $(\partial / \partial x_i)$ — оператор дивергенции; S_w и S_{Nw} — насыщенность смачивающей и несмачивающей фаз; Φ — пористость среды; k_{ij} — коэффициент проводимости; k_{Nrw} и k_{Nrw} — относительная проводимость смачивающей и несмачивающей жидкостей, μ_w и μ_{Nw} — вязкости смачивающей и несмачивающей фаз, P_w и P_{Nw} — давления смачивающей и несмачивающей фаз, g — ускорение свободного падения. Эти уравнения связываются уравнением капиллярного давления

$$P_c(S_w) = P_{Nw} - P_w$$

и условием

$$S_w + S_{Nw} = 1.$$

Получение вида функции P_c для конкретных сред представляет собой проблему. Кроме того, существуют серьезные основания считать, что функция P_c не может адекватно передать характер распределения порового давления.

Перколяционные модели. Теория перколяции была создана в качестве средства для описания переноса через случайные среды. Хотя поровая среда не является совершенно случайной, однако на уровне пор она достаточно нерегулярна для использования теории перколяции. Если движение жидкости ограничено средой со случайными характеристиками, влияющими на это движение, тогда процесс называется процессом перколяции. В теории перколяции строится решетка, состоящая из узлов и соединяющих их связей. Узлы соответствуют порам, а связи — сужениям пор. Координационное число узла — это число его связей. Обычно число связей варьирует от 3 до 6.

Связям и узлам, составляющим перколяционную решетку, можно присвоить числа, представляющие их относительные диаметры. Всасывание смачивающей жидкости моделируется перколяцией узлов. Узлы заполняются в порядке их расположения, причем вместе с узлом заполняются его связи. Значение случайной характеристики в момент образования связной сети узлов от одного края сети до другого называется порогом перколяции решетки. Внедрение несмачивающей жидкости в породу соответствует случаю перколяции связей. Теория перколяции дает возможность получать кривые капиллярного давления, кривые относительной проводимости и распределение остаточного насыщения.

Перколяционная теория использовалась для моделирования нестабильности фронта несмешивающихся жидкостей многими исследователями [1, 10, 16]. Моделирование проводилось в предположении, что среда однородна и конечные разности вязкостей, поле тяготения и стабилизирующее влияние поверхностного натяжения пренебрежимы. В отличие от моделей случайного блуждания, в модели перколяции свойства поровых сред учитываются относительно легко. Анизотропия может быть представлена предпочтительными направлениями связей, а вариации проводимости могут быть учтены посредством рандомизации связей и узлов в соответствии с распределением размеров пор. Однако включение в модель разности вязкостей, поля тяготения и макроскопического стабилизирующего эффекта поверхностного натяжения является сложной задачей. А так как каждый элемент решетки соответствует отдельной поре или сужению поры, то численное моделирование в натуральном масштабе невозможно. Одним из возможных выходов может быть привлечение понятия самоподобия для пересчета результатов численного эксперимента в нужный масштаб.

Таким образом, в однородной поровой среде микроскопические неоднородности вызывают возмущения изначально плоской поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей. Если дестабилизирующие силы преобладают над стабилизирующими, то образуются пальцы. Поверхностное натяжение действует в качестве стабилизирующего фактора, ограничивающего распространение пальцев критическим минимальным значением. После возникновения пальцев дальнейшее их распространение определяется потенциалами макроскопического движения жидкостей. В случае неоднородной среды распространение пальцев определяется скорее распределением значений давлений, обеспечивающих прорыв жидкости в пору, а не нестабильностью поверхности раздела. Таким образом, достаточно выделить те поры, в которых давление, обеспечивающее проникновение в них, меньше давления в наступающем фронте. Все другие поры, независимо от размеров, будут действовать как непроницаемая граница.

Выводы

Приведенные концептуальные модели миграции тяжелых неводных жидкостей в пористых и трещиноватых фильтрационных средах свидетельствуют о том, что мы имеем дело с весьма своеобразным источником загрязнения подземных вод. Высокая плотность этих загрязнений и их сравнительно низкая раст-

воримость в воде позволяют им легко проникать через ненасыщенную зону в водоносные горизонты и служить долговременным или практически постоянным источником ухудшения качества подземных вод. Специфика ТНВЖ, особенности их накопления в фильтрационных средах требуют разработки новых методов разведки очагов загрязнения. Эти методы должны базироваться на экспериментальном, натурном и теоретическом изучении данной проблемы. Рассмотренные концептуальные модели могут служить основой для математического моделирования процессов формирования и эволюции очагов загрязнения ТНВЖ в водоносных горизонтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chandler R., Koplik J., Lerman K., Willemsen J. F. Capillary displacement and percolation in porous media//J. Fluid Mech. 1982. V. 119. P. 249—267.
2. Cherry J. A. Contaminant migration in groundwater: Processes and Problems. Proceedings of the Second National Water Conference: The Fate of Toxics in Surface and Ground Water. Philadelphia Academy of Science. January 24—25. 1984.
3. Chuoke R. I., Van Meurs P., Van der Poel C. The instability of slow, immiscible, viscous liquid; liquid displacements in permeable media//Petrol. Trans. AIME., 1959.
4. Feenstra S. Groundwater Contamination by Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL) Chemicals//Geol. Assoc. of Canada, Annual Meeting, 1984. May 14.
5. Feenstra S. Subsurface Contamination from Spills of Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL) Chemicals//Proc. Techn. Seminar on Chemical Spills, Environment Canada, February 5—7, 1986. Montreal — Quebec, 1986. P. 11—22.
6. Feenstra S., Cherry J. A. Subsurface Contamination by Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL) Chemicals//Proc. Internat. Groundwater Symp. Internat. Assoc. of Hydrogeologists, May 1—4, 1988. Halifax, Nova Scotia, 1988.
7. Hill S. Channeling in packed columns//Chem. Eng. Sci. 1954. № 6. P. 247—253.
8. Hughes B. M., Gillham R. W., Mendoza C. A. Transport of trichlorethylene vapors in the unsaturated zone: A field experiment//Conf. on Subsurface Contamination by Immiscible Fluids, Internat. Assoc. of Hydrogeologists. Calgary, Alberta, 1990. April 18—20.
9. Hunt J. R., Sitar N., Udell K. S. Nonaqueous phase liquid transport and cleanup 2. Experimental studies//Water Resources Research. 1988. V. 24. № 8. P. 1259—1269.
10. Lenormand R., Zarcone C. Invasion percolation in an etched network: Measurement of fractal dimension//Phys. Rev. Lett. 1975. № 54(20). P. 2226—2229.
11. Mendoza C. A., Frind E. O. Advective-dispersive transport of dense organic vapors in the unsaturated zone 1. Model development//Water Resources Research. 1990. V. 26. № 3. P. 379—387.
12. Mendoza C. A., McAlary T. A. Modeling of ground water contamination caused by organic solvent vapors//Ground Water. 1990. V. 28. № 2. P. 199—206.
13. Plumb R. H., Jr., Pitchford A. M. Volatile organic scans: implications for ground water monitoring//Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater. National Water Well Association. Houston. 1985. November 13—15. P. 207—222.
14. Schwille F. Migration of organic fluid immiscible with water in the unsaturated zone//Pollutants in Porous Media: The Unsaturated Zone between Soil Surface and Groundwater/Eds B. Yaron, G. Dagan, J. Goldschmid. N. Y.: Springer, 1988. P. 27—48.
15. Villalme J. F. Investigations at sites contaminated with dense, non-aqueous phase liquids (NAPLs)//Ground Water Monitoring Rev. V. 5(2). P. 60—75.
16. Wilkinson D., Willemsen J. F. Invasion percolation: A new form of percolation theory//J. Phys. A: Math. Gen. 1983. № 16. P. 3365—3376.

Институт водных проблем РАН

Поступила в редакцию
24.IV.1995

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 624.131.471

© 1996 г. Ю. А. МАМАЕВ

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ

Приводится анализ современного опыта оценки и картографирования опасности природных процессов и явлений. Уточняются вопросы терминологии, а также систематики инженерно-геологических карт и природных процессов. Обобщаются и формулируются основные принципы составления и требования к назначению, содержанию и детальности карт природных опасностей разного масштаба. Рассматриваются основные методические подходы и схемы составления карт суммарной оценки опасности природных процессов. Даётся анализ проблем и перспектив развития картографирования природных опасностей. Результаты исследований направлены на дальнейшее совершенствование методики комплексных исследований и оценки опасности природных процессов.

Введение

Природные бедствия, включая опасные геологические процессы и явления, представляют собой значительную угрозу для населения городских, промышленных, сельскохозяйственных и других территорий и объектов. Их возрастающие масштабы, интенсивность и повторяемость обуславливают глубокую заинтересованность научных и проектно-строительных организаций, планирующих и административных органов, финансовых и страховых учреждений и просто широкой общественности в решении вопросов предотвращения или снижения ущерба от них. В связи с этим разработка научных основ изучения, контроля, прогнозирования и предупреждения опасных природных процессов и явлений (ОППЯ) является актуальной задачей, направленной на снижение экономического ущерба, сохранение жизни и здоровья людей, обеспечение безаварийного функционирования объектов народного хозяйства и охрану окружающей среды.

Безопасность различных природных и природно-технических систем на протяжении всего их «жизненного цикла» может (должна) планироваться и обеспечиваться на основе комплексного учета (изучения) исторических условий их формирования и развития, современного состояния, постоянного контроля за изменениями в процессе развития или эксплуатации объектов, разработки прогнозов их изменений и, наконец, принятия адекватных управленческих или инженерных решений со своевременной их реализацией. Данная проблема может быть решена путем проведения широкого комплекса исследований, включающих полевые, экспериментальные и аналитические методы.

Постановка задач и методика исследований

Цель проводимых исследований — разработка принципов, научных подходов и методов картографирования природных опасностей, обеспечивающих современный уровень планирования размещения на территории страны населения и различных объектов техносферы, безопасного с точки зрения возможных воздействий природных и природно-техногенных катастроф (ППТК). Важной частью данной проблемы является разработка методологии интегральной (суммарной)

оценки опасности ППТК на основе комплексного картографирования. Метод тематического картографирования является традиционным, широко известным и применяемым, наиболее разработанным и наглядным. Картографические модели служат достаточно точной и объективной основой для накопления, обобщения и анализа фактических данных, а также принятия планировочных или инженерных решений. Опыт работ и анализ материалов показывает, что построение тематических карт разного масштаба с различной детальностью, точностью и полнотой информации позволяет достаточно легко переходить с одного уровня принятия решений на другой: например, с федерального, планирующего в общем развитие производительных сил страны, на региональный и локальный, на которых осуществляются проектирование, строительство или защитные мероприятия конкретных объектов.

В настоящее время трудности создания инженерно-геологических карт нового поколения (опасности, уязвимости, риска и др.) заключаются в отсутствии четкой регламентации требований к назначению, масштабам и информативности карт, предназначенных для разных пользователей и уровней принятия решений; недостаточности опыта и методологического обоснования их составления как у нас в стране, так и за рубежом; слабой теоретической и методической разработанности общих классификаций карт и природных процессов, принципов параметризации опасностей и унификации их ведущих параметров. При этом преобладают изучение, оценка и картографирование отдельных видов природных опасностей. Разработка же комплексной оценки суммарной опасности ППТК представляет собой еще более сложную задачу из-за многообразия, разнохарактерности и разнонаправленности развития природных процессов, недостаточной разработанности приемов количественной оценки степени опасности и практического отсутствия методик и примеров составления подобного типа карт.

Разработка методологических основ комплексной оценки суммарной опасности ППТК для разных уровней принятия решений предполагает решение более конкретных задач: уточнение основных понятийных категорий проблемы; анализ современного отечественного и зарубежного опыта оценки и картографирования опасности природных процессов и явлений (ОППЯ); совершенствование систематики инженерно-геологических карт, природных процессов и их техногенных аналогов; формулирование требований к назначению, содержанию и детальности карт опасности разного масштаба; разработку принципов, методических подходов и схем составления карт суммарной опасности; анализ проблем и перспектив развития картографирования ОППЯ.

Методика выполнения исследований заключалась в сборе, обобщении, анализе и совершенствовании отечественного и зарубежного опыта изучения, оценки и прогнозирования ОППЯ с использованием методов природного картографирования. Были рассмотрены публикации и фондовые материалы разных ведомственных организаций (Гидропроект, ПНИИС, Гипроводхоз, МГУ, ВНИИГиМ, ВСЕГИНГЕО), содержащие разнообразные картографические модели.

Результаты исследований

Вопросы терминологии

В настоящее время при обсуждении вопросов обеспечения безопасности населения и объектов от ППТК достаточно часто употребляются термины «опасность», «уязвимость», «риск» и др. Однако в силу разной направленности знаний и опыта подготовки специалистов, занимающихся разными аспектами данной проблемы, очевидна неоднозначность трактования этих основных понятий. На практике это обуславливает различие подходов и приемов оценки ОППЯ, а в картографировании — большое разнообразие моделей. Поэтому в данной статье, по-видимому, целесообразно дать развернутые определения этих основных кате-

горий. В самом общем смысле под опасностью понимается ситуация в природе или в техносфере, в которой возможно возникновение опасных процессов или явлений, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую среду [1, 2, 12, 15]. В отечественной научной литературе под природными опасностями чаще всего понимают все отклонения состояния природной среды от диапазона уровней, оптимальных для жизнедеятельности людей, функционирования объектов хозяйствования, применяемых технологий и устройств [3, 4, 6, 7]. В зарубежной, в частности американской, литературе [1, 2, 13, 16] природную опасность определяют как «естественно возникшее или вызванное человеком природное условие или явление, которое обуславливает риск или потенциальную угрозу для жизни человека или его собственности». В частности, геологическая опасность определяется как ситуация, возникающая в результате строительно-хозяйственной деятельности человека или наличия неблагоприятных геологических условий [17—19]. Степень геологической опасности зависит как от вида и интенсивности хозяйственной деятельности человека, так и естественных геологических условий. В соответствии с материалами международных научно-методических совещаний по разработке новых методов составления природных карт, в том числе опасности, уязвимости и риска, в общем принято понимать: под природной опасностью — вероятность проявления потенциально опасного процесса или явления на данной территории в определенный период времени; под риском — ожидаемый социально-экономический ущерб (убыток) от возможного случая проявления опасного природного процесса или явления, выраженный в количестве погибших и раненых людей, стоимости их личной собственности и объектов хозяйственно-экономической деятельности. Иначе, риск понимается как возможная реализация опасности или условно материализованная опасность, зависящая (оцениваемая) как от параметров ОППЯ, так и от характера использования и ценности территорий и объектов, которые эти процессы могут поразить. Под уязвимостью (потенциальной пораженностью) понимают степень потерь (ущерба) разных элементов риска (одного или нескольких) в случае реализации природного явления данной величины (силы). К элементам риска могут относиться: территории (земли), население, виды частной собственности, объекты хозяйственно-экономической деятельности, включая инфраструктуру, коммуникации и коммунальные услуги, социально-общественные проблемы и др. Уязвимость или степень потенциального ущерба, отнесенная к той или иной территории (зоне) и выраженная в стоимостной форме, составляет основное содержание карт риска.

Анализ методов картографирования природной опасности

Анализ современного отечественного и зарубежного опыта оценки и картографирования природных опасностей [2—6, 17, 19] показывает, что на данный момент нет единой законченной и общепринятой методики составления карт комплексной оценки суммарной опасности ППТК, а разрабатываются в основном смежные направления картографирования, в частности инвентаризационные карты (карты фактов или распространения и видов природных процессов), карты чувствительности территорий к опасным процессам и др. Каждое из этих направлений картографирования содержит несколько модификаций карт, отражающих, как правило, разные геологические особенности территорий, а также задачи и методики исследований. Картографирование природной опасности и риска может выполняться в разных масштабах и с разной целевой направленностью: планирование размещения населения и объектов хозяйствования, градостроительство, сельское хозяйство, экологический мониторинг и т. д. В нашей стране преобладает подход к разработке обзорных мелкомасштабных карт опасности процессов общего назначения (многоцелевых) [6—10]. Аналогичное зарубежное картографирование в основном ориентируется на решение конкретных задач разнопланового строительства с построением средне- и крупномасштабных

карт, рассчитанных в том числе на неспециалистов, принимающих административные и планирующие решения [1, 13, 15, 16, 18]. Общепринятого ранжирования степеней опасности природных процессов нет. В зависимости от целей, масштабов и детальности исследований обычно выделяют от 3 до 6 градаций опасности. На картах зоны с разной степенью опасности показывают разными цветовыми гаммами, как правило, по «светофорному» принципу: зеленые цвета — малая степень опасности, желто-оранжевые — средняя, красные — высокая. Построение карт опасности в ряде стран (США, Япония, Италия, Франция) осуществляют с использованием компьютерных геоинформационных систем [15, 16]. Работы по их составлению имеют законодательную основу и финансовую поддержку как на местном, так и федеральном уровнях [16].

Систематика инженерно-геологических карт и природных процессов

Как правило, карты и разрезы являются основными итоговыми отчетными документами, содержащими в наглядной графической форме главные результаты исследований. Их масштабы, содержание и детальность зависят от целей, задач и стадий исследований, сложности инженерно-геологических условий территорий и конкретных объектов строительства. Инженерно-геологические карты существенно отличаются друг от друга по характеру данных, принятых за основу их содержания. Все это обуславливает целесообразность дальнейшей разработки систематики инженерно-геологических карт с учетом их назначения, содержания и методов составления. Этому вопросу посвящены работы Коломенского Н. В., Попова И. В., Сергеева Е. М., Трофимова В. Т., Золотарева Г. С., Голодковской Г. А. и других ученых.

В настоящей статье предлагается новый вариант общей систематики инженерно-геологических карт. В соответствии с ней разработанные и применяющиеся в настоящее время инженерно-геологические карты (около 50 видов) могут быть систематизированы по классам, группам и типам. Предлагается выделять два класса карт: аналитические и синтетические (обобщающие). На аналитических картах обычно отражают один или несколько ведущих факторов, определяющих инженерно-геологические условия территорий, без их комплексной оценки и прогноза изменений. Синтетические карты содержат интегральную оценку природных или природно-техногенных факторов с элементами прогноза их изменений в процессе геологического развития территорий или в связи со строительством и эксплуатацией объектов.

Аналитические карты подразделяются на три группы: частные (вспомогательные), общие и специализированные. Частные карты показывают тип, распространение и характер одного или нескольких факторов. Общие карты содержат информацию пригодную для любых видов строительства. Специализированные карты ориентированы на специфические данные, важные для отдельных конкретных видов строительства. Аналитические частные и общие карты обычно бывают трех видов: инвентаризационные, инженерно-геологических условий и инженерно-геологического районирования. Среди аналитических специализированных карт преобладают два типа: прогнозные и районирования.

Синтетические (обобщающие) карты подразделяются на две основные группы: общие и специализированные. Общие карты характеризуют обобщенное отображение наиболее важных природных условий и факторов, отвечающих требованиям проектирования разных видов строительства. Здесь преобладают два типа карт: инженерно-геологических условий и реже прогнозные. Причем первые могут являться унифицированными и составляться по единой методике при планомерных съемочных работах. Среди синтетических специализированных карт преобладают карты инженерно-геологического районирования, позволяющие на основе классификационных признаков выделять территориальные элементы, обладающие общностью природных условий, в том числе факторов развития

природных процессов. Данные карты могут быть трех подтипов (направлений): генетико-морфологического (естественно-исторического), оценочного сравнительного и оценочного геолого- (природно-) экономического районирования.

Исходя из данной классификационной схемы, карты, отражающие и характеризующие ОППЯ, могут быть трех основных типов:

1. Аналитические общие инвентаризационные карты. К ним относятся широко известные карты распространения и генетических типов природных процессов, геоморфологические карты ОППЯ, карты типов и активности ОППЯ, карты повторяемости ОППЯ и др.

2. Аналитические частные карты целевого инженерно-геологического районирования, например, по степени развития (опасности) того или иного отдельного процесса (просадочности, набухаемости, оползней, эрозии и др.) или генетически связанных процессов.

3. Синтетические специализированные карты районирования оценочного сравнительного направления (прогнозные карты развития ОППЯ, инженерно-геодинамические карты, карты опасности отдельных видов ОППЯ).

С позиций предложенной систематики карты комплексной оценки суммарной опасности ОППЯ по назначению, содержанию и отдельным приемам их составления относятся к синтетическим специализированным картам оценочного сравнительного районирования общего назначения. Они близки к картам оценочного геолого- (природно-) экономического районирования: уязвимости и риска. В связи с этим при составлении карт суммарной опасности ОППЯ целесообразно руководствоваться общими методологическими подходами (основами) комплексного инженерно-геологического районирования.

Для оценки степени опасности того или иного природного процесса обычно используют одинаковый набор параметров, характеризующих их вероятность и повторяемость развития, масштабы (размеры), продолжительность, интенсивность и отдельные динамические характеристики их воздействия на окружающую среду и объекты техносферы. По типу проявления выделяются процессы внезапные быстро-развивающиеся («катастрофические») и длительные медленнотекущие («прогрессирующие»). Внезапные ОППЯ происходят, как правило, отдельно (индивидуально), характеризуются неожиданностью события, короткой продолжительностью, значительной интенсивностью, быстрой разрушений и обычно тяжелыми последствиями — человеческими жертвами и значительным материальным ущербом. Медленные «прогрессирующие» ОППЯ обусловливаются медленно протекающими процессами физических, химических, биологических и климатических изменений. В отличие от внезапных бедствий они обычно не сопровождаются разрушениями строений и гибелю людьей, из-за чего ими часто пренебрегают. Но они не только наносят ущерб сельскому хозяйству и строительным объектам, составляя громадный суммарный эффект, но и сильно влияют на экологию территории. В сравнении с «катастрофическими» бедствиями такие «прогрессирующие» опасности, как эрозия почв, опустынивание, засоление грунтов и др., могут иметь значительно более серьезные последствия для экологии окружающей среды и условий сельскохозяйственного производства. Те и другие процессы могут отличаться особенностями своего развития. ОППЯ могут происходить группами и синхронно или последовательно в виде генетически обусловленных цепочек, когда одни процессы вызывают другие. Кроме того, некоторые ОППЯ могут трансформироваться в ходе своего развития в другие. Для одних ОППЯ характерно непрерывное развитие процесса, для других циклическое. Например, оползни могут активизироваться после определенного периода стабилизации. Наконец, ОППЯ могут как ускоряться, так и тормозиться человеческой деятельностью. В связи с этим в последнее время делается попытка учета «регулируемости» процессов, иначе, возможности управляемого снижения ущерба от них.

С учетом всех этих особенностей предлагается новая общая классификация природных процессов и явлений, включающая геологические процессы и их техногенные аналоги. В предлагаемой классификации более 130 видов природных

процессов и явлений группируются по классам, группам и типам. Ведущим признаком выделения классов ОППЯ является среда, в которой они формируются и развиваются. В данной классификации выделены три класса процессов: атмосферные, гидросферные и литосферные. Очевидно, в дальнейшем эта классификация может быть дополнена и другими классами процессов, например планетарных космических, глубоких горизонтов земли и др.

В каждом из классов по условиям и причинам развития выделяются три группы процессов: природные (естественные), техногенные (антропогенные) и комбинационные. Всего девять групп. Типы ОППЯ обособляются (группируются) по генетическим признакам и ведущим факторам их развития. В группе атмосферных природных процессов выделяются три подгруппы: температурные, связанные с выпадением осадков и обусловленные циркуляцией воздушных масс, которые по физическим параметрам, характеризующим их состояние или механизм развития, могут подразделяться на типы.

Аналогично гидросферные природные процессы подразделяются на две подгруппы: морские и континентальные,— а те в свою очередь на типы: процессы и явления шельфов и склонов морей и океанов, морских вод и течений и поверхностных вод: рек, озер и болот.

Наиболее объемной и сложной является систематика литосферных процессов и явлений, включающих около 40 видов процессов. Этот раздел классификации составлен на основе трудов отечественных и зарубежных ученых: Саваренского Ф. П., Приклонского В. А., Попова И. В., Котлова Ф. В., Чурикова М. В., Золотарева Г. С., Емельяновой Е. П., Ломтадзе В. Д., Джегера Ч., Шарпа С., Варнеса Д., Уолтхема и др.

В группе литосферных природных процессов выделяются две подгруппы: эндогенных и экзогенных процессов, которые подразделяются на типы: первые — на глубинные и поверхностные, а вторые — в зависимости от ведущих групп факторов их развития — на обусловленные: изменениями термодинамических условий среды, деятельностью подземных или поверхностных вод, действием силы тяжести, изменением напряженно-деформированного состояния массивов пород, деятельностью ветра, а также процессами замерзания и оттаивания пород. В предложенной классификации в качестве отдельной группы литосферных процессов выделяются инженерно-геологические (техногенные) процессы, которые являются аналогами природных геологических процессов, но вызваны строительно-хозяйственной деятельностью человека. По причинам и условиям развития они условно могут делиться на две подгруппы: строительные (технологические) и эксплуатационные. Они имеют тесную связь и, в свою очередь, их можно подразделить на типы, обусловленные особенностями конкретных видов строительства: дорожного, гражданского, гидротехнического, мелиоративного и др.

В качестве отдельной группы литосферных процессов предлагается выделять комбинационные (наложенные природные и техногенные) процессы, имеющие, как правило, большое экологическое значение (воздействие). Условно их можно разделить на две подгруппы: преимущественно связанные с использованием окружающей среды и с воздействиями объектов техносферы (реализация крупных трансрегиональных проектов, ядерные испытания, захоронения отходов). В данной классификации предлагается отмечать специальными условными знаками природные процессы быстроразвивающиеся «катастрофические» и медленные «прогрессирующие», поддающиеся и не поддающиеся управляемому снижению ущерба от них, а также имеющие значительные экологические последствия. Необходимо отметить, что предложенная классификационная схема может являться готовой структурированной основой для составления каталогизированных банков данных по природным процессам.

Принципы, требования и методические приемы картирования суммарной опасности природных процессов

Анализ существующих и разрабатываемых методик картографирования природных опасностей позволил сформулировать следующие принципиальные положения методики целевого инженерно-геологического районирования территорий по степени опасности природных процессов.

1. Целевое районирование должно выполняться таким образом, чтобы оно могло служить научной основой для накопления, обобщения и экстраполяции данных научных исследований и практических наблюдений опасных природных процессов, а также прогнозирования их развития в пространстве и во времени с целью принятия своевременных адекватных превентивных мер.

2. В схемах и картах районирования по степени опасности должны найти дифференцированное или интегральное отражение взаимосвязи как между отдельными компонентами природной среды, включая инженерно-геологические условия и факторы развития ОППЯ, так и между природной обстановкой в целом и объектами техногенного воздействия на нее.

3. Для выбранного масштаба исследований (картирования), обусловленного назначением и детальностью карт, должны устанавливаться размеры таксономических элементов, позволяющие делить территории на части, удобные для восприятия и анализа, в том числе лицами (неспециалистами), принимающими административные и планирующие решения.

4. Должны быть обоснованы и сформулированы основные классификационные признаки и критерии выделения зон различной опасности отдельных ОППЯ, позволяющие различать их по генезису и характеру проявлений.

5. Совокупность выделяемых таксонов должна быть необходимой и достаточной для выполнения районирования в разных масштабах с учетом необходимости составления в перспективе карт не только в масштабах страны, но и крупных регионов и районов, где сосредоточены важные объекты, в частности, с опасным производством.

6. Районирование должно завершаться построением синтетических оценочных сравнительных карт опасности, построенных по типологическому или смешанному принципу. В последнем случае наиболее крупные таксоны могут обособляться, как при региональном (индивидуальном) районировании, с учетом структурно-тектонических, геологических, геоморфологических, климатических особенностей территорий, а более мелкие — как типологические. Для выделения и характеристики последних используются приемы оценочного сравнительного районирования по степени опасности.

7. Карты опасности должны отражать основные закономерности распространения зон с разной степенью опасности природных процессов, а также ведущие природные факторы, обуславливающие эту опасность и важные с точки зрения планирования и проектирования защитных мероприятий.

8. При составлении карт опасности важен учет прогнозных изменений и максимальных уровней опасности тех или иных видов ОППЯ.

Районирование территорий по степени опасности ОППЯ проводится на основе общей систематики природных процессов в комбинации с основными факторами и условиями, определяющими их распространение и развитие: тектоническими, геологическими, геоморфологическими, климатическими, техногенными и др. Несмотря на большое разнообразие схем и методик составления карт опасности природных процессов, общая последовательность разработок карт включает следующие основные этапы:

составление аналитических инвентаризационных карт отдельных процессов и явлений с характеристикой их размеров (масштабов), повторяемости, интенсивности, направленности;

использование вспомогательных аналитических карт (геологических, тектонических, геоморфологических, климатических, техногенной нагрузки и др.)

для анализа влияния отдельных природных и техногенных факторов на развитие того или иного процесса;

уточнение закономерностей пространственного и временного развития природных опасностей по материалам аэро- и космофотосъемок и дистанционного зондирования за ряд лет;

определение признаков и критериев выделения зон разной степени опасности для отдельных видов ОППЯ;

построение карт отдельных видов ОППЯ на основе типизации и параметризации процессов по степени их опасности, а также разработки унифицированных легенд;

обобщение важнейших данных на синтетических картах комплексной оценки суммарной опасности ОППЯ.

Методика составления карт суммарной опасности ОППЯ находится в стадии разработки. Также требуют совершенствования методики построения карт опасности отдельных видов ОППЯ. При картографировании индивидуальных природных опасностей, а именно, на инвентаризационных картах, должны быть отражены следующие сведения: где данные процессы происходили в прошлом, случаются сейчас и могут произойти в будущем; тип, механизм и направленность развития процесса; информация о вмещающей среде; интенсивность и повторяемость процессов; информация о параметрах динамического воздействия процесса или явления на территорию и сооружения.

Другой тип карт природных опасностей, а именно типологического районирования по степени опасности, должен предусматривать: отражение пространственного распространения данного процесса по площади, реже по глубине; характеристику интенсивности и повторяемости процесса; прогнозную оценку максимального уровня проявления опасности; учет типа и интенсивности хозяйственного использования территорий; анализ случившихся или возможных потерь, выраженный в качественной (описательной) или количественной форме и характеризующий степень и вид разрушений, площади поражения, количество жертв и материальный ущерб; выработку рекомендаций по освоению территорий или отдельным видам строительства, защитным мероприятиям.

В соответствии с методикой комплексного природного, в том числе инженерно-геологического районирования карты опасности ППТК могут и должны сопровождаться экспликациями, где в табличной форме для всех или важнейших территориальных выделов (таксонов) могут даваться описательные или количественные характеристики самих процессов, природной среды, объектов техносферы и др. Данные требования полностью распространяются на карты комплексной оценки суммарной опасности ППТК. Основное их назначение состоит в обосновании принятия планировочных, административных или инженерных решений по безопасному размещению (или защите) населения и различных объектов техносферы от возможных воздействий ОППЯ. В общем можно сказать, что мелкомасштабная карта суммарной опасности ППТК федерального уровня — стратегический документ нормативного характера и общего назначения, предназначенный для планирования всех видов хозяйственной деятельности, безопасной с точки зрения освоения и рационального использования окружающей среды и безаварийной эксплуатации объектов. Данная карта должна являться фундаментальным научным обобщением разнообразных сведений о природной среде, факторах ее изменения и закономерностях пространственного и временного развития ОППЯ. Ее достоинством будет являться и то, что она позволит быстро и на больших пространствах показать места концентрации природных опасностей, где в случае их обязательного освоения должны проводиться специальные более детальные исследования.

Представляется целесообразным составление карт суммарной опасности ППТК в двух вариантах для разных пользователей, а именно на федеральном (региональном) уровне в качественных оценках и с сокращенным числом генерализованных территориальных единиц — для лиц, принимающих решения в

планирующих и административных органах; на региональном и локальном уровнях, преимущественно в количественных показателях и с детализацией территориальных выделов, для специалистов различных организаций научного, проектно-строительного, экологического, оборонного профилей и спасательных служб.

Обзорные и мелкомасштабные карты суммарной опасности ППТК общего назначения составляют на основе данных, полученных путем анализа, выбора и обработки информации, содержащейся на различных природных картах, а также установленных специальными полевыми, дистанционными и аналитическими исследованиями. Такие карты в основном отражают:

виды (или комбинации видов) регулярно повторяющихся (фоновых) природных опасностей, выделяемых в границах их преимущественного распространения и характеризуемых комплексной оценкой степени опасности; генезис ОППЯ с указанием превалирующих природных или техногенных условий их возникновения или активизации;

масштабы (объемы или площади), интенсивность и отдельные количественные характеристики индивидуальных ОППЯ.

В настоящее время выделяются и разрабатываются два основных направления построения карт комплексной оценки суммарной опасности ППТК:

1. Территориальное деление на основе качественной «экспертной» оценки преобладающих типов и степени опасности природных процессов, имеющих наибольшее распространение или подавляющее значение для жизнедеятельности людей и условий эксплуатации объектов.

2. Районирование территорий по формализованной интегральной количественной «балльной» оценке суммарной опасности ППТК на основе применения аддитивного метода обработки информации о разных природных опасностях.

При составлении карт первого направления учитываются следующие принципиальные положения:

1) если современная активность ОППЯ высокая, т. е. они протекают интенсивно и на больших площадях, то и вероятность их дальнейшего развития большая. И наоборот, если процессы протекают вяло и в небольших масштабах, значит условия для их развития неблагоприятные и вероятность их развития мала;

2) на рассматриваемых территориях дается «экспертная» оценка значимости (удельного веса) преобладающих ОППЯ в общем балансе опасностей. При их ранжировании основное значение и внимание уделяется тем процессам, при максимальной реализации которых социально-экономические потери будут несопоставимо выше потерь от других опасностей. Такие экспертные оценки устанавливаются из опыта исследований и факторного анализа условий развития ППТК. Оценки являются во многом субъективными, зависящими от опыта, квалификации и интуиции разработчиков, и носят в основном качественный описательный характер.

Примерами такого рода карт могут являться карты-схемы инженерной защиты территорий и объектов, в частности карта инженерной защиты территории республики Таджикистан от оползней, обвалов селей и лавин масштаба 1 : 200 000 (1987 г.); всемирная карта природных опасностей (землетрясения, извержения вулканов, торнадо, грозы) масштаба 1 : 33 000 000 (1978 г.); карта сейсмического районирования территории СССР масштаба 1 : 5 000 000 (1983 г.); карта опасных геологических процессов территории России масштаба 1 : 5 000 000 и др.

Другим направлением картографирования суммарной опасности ППТК является районирование территорий по формализованной интегральной количественной «балльной» оценке суммарной опасности ППТК на основе аддитивного метода обработки информации о разных природных процессах, условиях и факторах их развития. В опубликованной литературе имеются примеры такого подхода при оценке сложности инженерно-геологических условий территорий для разного вида строительства. В этом случае при районировании территории каждый показатель инженерно-геологических условий (геологическое строение, подземные

воды, рельеф, геологические процессы и пр.) ранжировался и оценивался в баллах, а общая оценка определялась их суммированием. Примером количественной оценки суммарной опасности от нескольких природных процессов является «Общая схема инженерной защиты территории России от опасных природных и техногенных процессов масштаба 1 : 5 000 000» (1990 г.) Правда, по своему содержанию она больше приближается к картам геолого-(природно)-экономического районирования.

Анализ проблем и перспектив развития картографирования природных опасностей

Анализ существующих и разрабатываемых методик оценки и картографирования ОППЯ показал, что среди причин, тормозящих развитие этого направления исследований, следует назвать отсутствие четкой регламентации требований к назначению, масштабам, детальности и информативности карт опасности, пред назначенных для разных пользователей и уровней принятия решений; отсутствие единой общепринятой систематики ОППЯ и системы их ранжирования по степени опасности, что обуславливает разнообразие подходов и схем картографирования; отсутствие единых подходов и критериев оценки значимости (удельного веса) каждого процесса в общем балансе опасности на рассматриваемых территориях с учетом их региональных и зональных особенностей, отсутствие законодательной базы и недостаточное финансирование данных исследований; а также разные направленность и уровень подготовки специалистов, занимающихся проблемами ППТК, неоднозначность трактования и реализации ими на практике основных понятий и задач исследований.

Очевидной является необходимость доработки некоторых существующих методик составления карт ОППЯ с целью повышения их детальности и информативности. При этом необходимо уделять внимание унификации изобразительных средств для обеспечения возможности совместного прочтения карт, дополнения и взаимного наложения информационных полей. Требуется также совершенствование имеющихся систем параметризации и типизации ОППЯ по степени опасности их воздействия на основе анализа не только возможных потерь, но и социально-общественных проблем, связанных с этими воздействиями, а также анализа эффективности и стоимости технологий, смягчающих эти воздействия.

Перспективы данного направления исследований, очевидно, связаны с совершенствованием и широким применением дистанционных методов изучения, оценки и прогнозирования ОППЯ, в том числе с применением автоматизированных систем обработки материалов комплексных съемок и зондирований с различных носителей. Важным здесь является разработка дешифровочных признаков, позволяющих выделять территории, подготовленные к возможным опасным проявлениям, подверженные им (активная стадия) и стабилизированные или измененные последующими процессами и растительностью. Безусловно, перспективным с точки зрения технологичности получения и информативности результатов является разработка и применение компьютерных геоинформационных систем, обеспечивающих создание и хранение банков данных, каталогизацию и статистическую обработку отдельных параметров процессов и явлений, получение неограниченного числа «информационных слоев» на рассматриваемых картографических моделях («электронных картах»), построение интегральных полей распределения параметров при любом сочетании информационных слоев, быстрое графическое получение результатов, обеспечивающее возможность имитационного прогнозного моделирования, быструю коммуникационную передачу результатов заказчику и др. Очевидно, что применение методик и способов исследований, основанных на использовании современных высоких технологий, обеспечит эффективность и конкурентоспособность их конечных результатов.

Заключение

Содержание статьи заключает в себе опыт систематизированного обобщения существующих и разрабатываемых в настоящее время понятий, подходов, приемов и методов качественной и количественной оценки степени опасности природных процессов и явлений на основе применения комплексного природного районирования. Основной упор сделан на анализ и разработку методологических аспектов комплексной оценки и картографирования суммарной опасности природных процессов и явлений.

Результаты исследований нацелены на обеспечение современного уровня планирования безопасного размещения населения и крупных объектов техносфера на территории страны.

В статье рассмотрены и уточнены отдельные понятийные категории проблемы оценки природных опасностей. Обобщены принципы составления карт природных опасностей и сформулированы требования к их назначению, содержанию и детальности в зависимости от направленности и масштабов исследований.

На основе современного опыта картографирования природных опасностей показана необходимость дальнейшего совершенствования методологических основ, в частности, систематики инженерно-геологических карт с учетом их нового поколения: карт опасности, уязвимости, риска.

Предложена и рассмотрена новая классификация природных и природно-техногенных процессов, охватывающая около 200 видов процессов и явлений. Она может являться готовой структурированной основой для составления банков данных по природным процессам.

Выделены и охарактеризованы два основных направления построения карт суммарной опасности природных процессов на основе использования качественных «экспертных» и количественных «балльных» оценок степени опасности преобладающих природных процессов и явлений.

Показано, что для дальнейшего развития данного направления исследований перспективными являются современные высокотехнологичные способы получения и обработки картографической информации.

В целом выполненные исследования отражают современный уровень развития данного направления исследований и нацелены на их дальнейшее совершенствование и практическую применимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бовис М. Д., Айве Д. Д. Картографирование стихийных бедствий в горах Сан Жуан, Колорадо, США//Высокогорная геоэкология. М.: 1976. С. 85—88.
2. Варнес Д. Методы составления карт оползневой опасности//Оползни и сели: Сб. докл. Межд. сем. в Алма-Ате, октябрь, 1981. М.: Центр международных проектов. ЮПЕИ, ЮНЕСКО, ГКПТ, 1982. С. 379—399.
3. Ващалова Т. В., Окалов В. Ф. Состояние мелкомасштабного картографирования неблагоприятных и опасных природных явлений//Геогр. опасн. природных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1988. (Рукоп. деп. в ВИНИТИ 08.07.88 № 5524—В88).
4. Голодковская Г. А., Елисеев Ю. В. Геологическая среда промышленных регионов. М.: Недра, 1989. 218 с.
5. Инженерно-геологическая карта районирования западной части зоны БАМ по интенсивности проявления экзогенных геологических процессов. М-б. 1 : 500 000 М.: ГУГК, 1988.
6. Карта опасных геологических процессов России. М-б 1 : 5 000 000. М.: ПНИИС, 1990.
7. Карта опасности развития геологических и гидрометеорологических процессов территории России. Масштаб 1 : 5 000 000. М.: ПНИИС, 1990.
8. Карта прогноза просадочности территории распространения лесовых пород в СССР. М-б 1 : 2 500 000/Под ред. Е. М. Сергеева, В. С. Быковой. М.: ПНИИС, 1989.
9. Карта сейсмического районирования СССР. М-б 1 : 5 000 000./Под ред. М. А. Садовского. М.: АН СССР, ГУГК, 1983.

10. Карта селеопасных районов территории СССР. М-б 1 : 8 000 000. М.: ПНИИС, МГУ, 1987.
11. *Мамаев Ю. А.* Пути совершенствования методики инженерно-геологического районирования для целей мелиорации//Тез. Докл. V Всесоюз. совещ. по мелиорат. гидрогеологии, инж. геологии и мелиоративн. почвоведению (г. Новая Каховка), 18—21 сент. 1984 г. М.: Союзводпроект, 1984. С. 27—30.
12. *Уолтхэм Т.* Катастрофы: неистовая земля. Л.: Недра, 1982. 204 с.
13. *Alexander D.* Natural disasters. USA, 1990.
14. *Berz G. A.* Global warning and the insurance industry//Nature and Resources. 1991. V. 27. P. 19—31.
15. *Brabb E. E., Harrod B. L.* Landslides: extent and economic significance//Proceedings of the 28th Internat. geol. Congr.: Sypos. on Landslides, Washington, D. C., 17 July 1989, ed. by E. E. Brabb. Menlo Park, California: US Geological Survey, 1989. 400 p.
16. *Brabb E. E.* Proposal for worldwide landslide hazard maps//Proceedings of the Seventh international conference and field workshop on landslides in czech and slovak republics (28 august — 15 september 1993) /Ed. by St. Novosad, Novosad IG/EG-Consulting. Ostrava: Peter Wagner, Bratislava: Comenius University. P. 15—27.
17. Geological hazard type map of China, scl 1 : 5 000 000. Chengdu Hydrogeological and Engineering Geology Center, Geological Publishing House. Beijing, China, 1991. 13 p.
18. *Corominas J., Esgleas J., Baeza C.* Risk mapping in the Pyrenees area a case study/IAHS. Publ.: [Pap] Two Int. Symp. «Hydrol. Reg. 2. Artif. Reservoirs; Water and Slopes» Lausanne, Any — 1 sept. 1990. № 194. P. 425—428.
19. *Kanacubo T., Tanioka S.* Natural Hazard Mapping//Geojurnal. 1980. V. 4. № 4. P. 333—340.

Инженерно-геологический
и геоэкологический научный центр
Российской академии наук
/ИГЦРАН/

Поступила в редакцию
14.VI.1995

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 624.131

© 1996 г. Н. Н. МЕЛЬНИКОВ, А. А. КОЗЫРЕВ, А. В. ЛОВЧИКОВ,
С. П. РЕШЕТНИК

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИ ОТРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Приведены количественные данные об объемах добываемых руд и перемещаемых горных массах на месторождениях Кольского полуострова. Показаны виды и методы контроля, даны количественные характеристики временных наблюдений за состоянием массивов при воздействии горных работ. Установлено изменение геодинамического режима региона вследствие крупномасштабного техногенного воздействия. Показана необходимость мониторинга земных недр в районах интенсивного ведения горных работ.

Кольский полуостров относится к числу крупных горнопромышленных районов России. Интенсивная отработка месторождений полезных ископаемых ведется в центральной, западной и северной частях полуострова. В центральной части ведет добывчу апатито-нефелиновых руд АО «Апатит», железных руд — АО «Олкон» (бывший Оленегорский ГОК), редкометалльных руд — АО «Севредмет» (бывший Ловозерский ГОК). На севере, вблизи западной границы Мурманской обл. ведет добывчу медно-никелевых руд ГМК «Печенганикель», комплексных руд — АО «Ковдорский ГОК», слюды — АО «Флогопит» (бывший ГОК «Ковдорслюда»). Длительная крупномасштабная выемка и перераспределение больших масс горных пород, изменение рельефа поверхности приводят к изменению геодинамического режима территории.

Крупномасштабная добыча и переработка полезных ископаемых на Кольском полуострове осуществляется с 30-х годов. Наиболее длительный срок отработки имеют апатитовые рудники (Кировский рудник — с 1930 г.), слюдяные рудники месторождения «Ена» — с 1934 г. (в настоящее время консервируются), медно-никелевые месторождения Мончегорск (с 1937 г.) и медно-никелевые месторождения комбината «Печенганикель» (рудник «Каула» — с 1946 г.) [4]. По объемам добычи полезных компонентов рудники различны: так, открытые и подземные рудники АО «Апатит», являющиеся крупнейшими на Кольском полуострове, в десятки раз превышают по объемам добычи рудники таких предприятий, как АО «Севредмет» и АО «Флогопит». Обычно наибольшее воздействие на окружающие ландшафты и геологическую среду оказывают предприятия, на которых ведутся крупномасштабные горные работы открытым способом, т. е. карьерами с поверхности, так как именно на этих предприятиях вынимаются и перемещаются в пространстве наибольшие объемы горных пород. В табл. 1 показаны годовые объемы добычи и вскрыши на наиболее крупных карьерах Мурманской обл. Производительность подземных рудников меньше и составляет обычно от 0,5 до 10 млн. т горной массы в год.

Однако степень воздействия подземных рудников на вмещающие породные массивы зависит не только от объемов перемещаемых горных масс, но и от горно-геологических условий залегания руд. Так, например, Ловозерское редкометалльное месторождение, представленное пологопадающими залежами

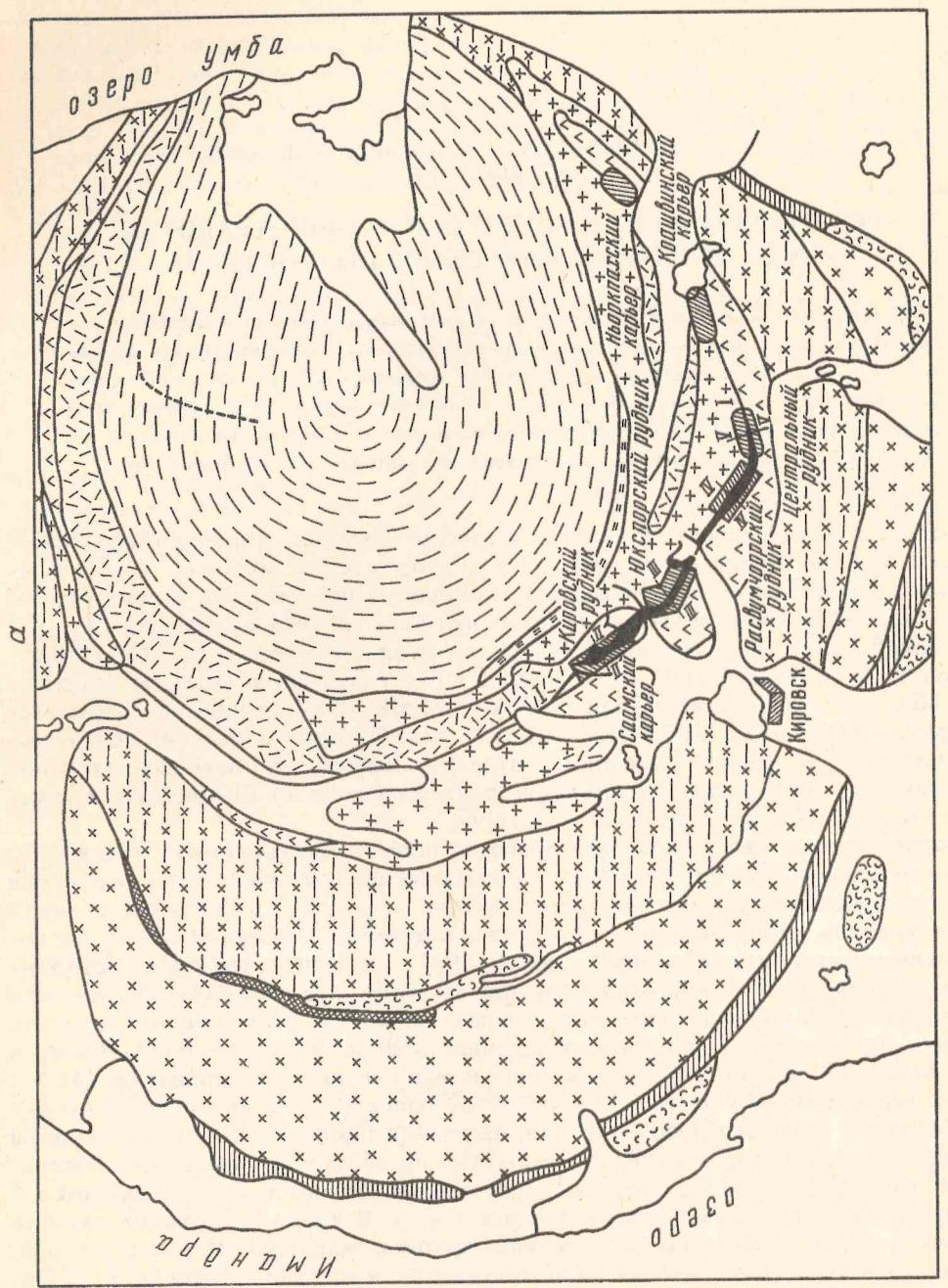


Рис. 1(а)

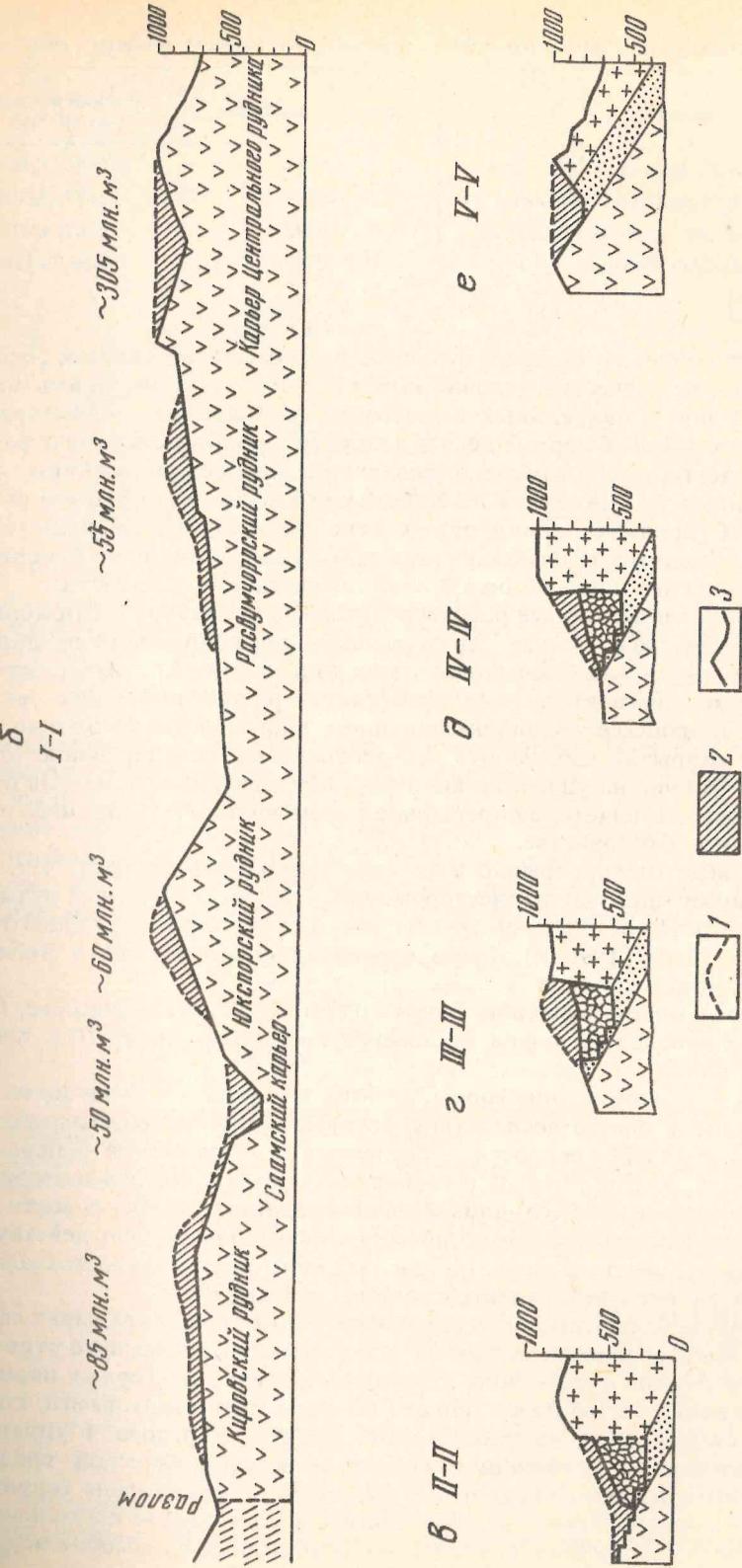


Рис. 1. Схема отработки месторождений в Хибинском массиве: а – геологическая карта; вертикальные разрезы по линиям: б – I–I (приведены объемы выемками пород на отдельных рудниках и карьерах), в – II–II, г – III–III, д – IV–IV, е – V–V, 1 – первоначальный рельеф, 2 – извлеченные объемы горной массы, 3 – существующий рельеф

Таблица 1

Показатели вскрыши и добычи крупнейших карьеров Мурманской области (1990 г.)

Предприятие	Добыча руды, тыс. т	Выемка вскрыши тыс. м ³ /тыс. т
Карьер Центрального рудника (АО «Апатит»)	26929	13441/37640
Карьеры Восточного рудника (АО «Апатит»)	13123	18429/52520
Карьер «Железный» (АО «Ковдорский ГОК»)	16393	16167/49310
Оленегорский карьер (АО «Олкон»)	7550	8860/24810

малой и средней мощности и отрабатываемое в основном подземным способом, вследствие горно-геологических условий имеет большую протяженность подземных очистных и подготовительных выработок, исчисляемую километрами, и достигает в целом длины в первые десятки километров. Воздействие отработки этого месторождения на состояние Ловозерского массива сопоставимо с воздействием рудников АО «Апатит» на Хибинский массив, хотя добыча руды на рудниках АО «Севредмет» значительно меньше. Апатитовые рудники, где отрабатываются мощные пологопадающие залежи, выходящие на поверхность на склонах Хибинского массива, более локализованы в пространстве.

Наиболее интенсивные горные работы ведутся в центральной части Кольского полуострова в Хибинском массиве. Здесь расположено крупнейшее предприятие по производству сырья для фосфатных удобрений — АО «Апатит» с четырьмя рудниками, двумя обогатительными фабриками и другими более мелкими предприятиями. В процессе горнопромышленного производства постоянно ведется подземная и открытая добыча руд, их переработка, складирование отходов обогатительных фабрик на удалении километров и десятков километров от мест их извлечения, осуществляется непрерывное перемещение больших масс горных пород во времени и пространстве.

Добыча руд ведется непрерывно в течение нескольких десятков лет, объем добычи на Хибинских апатитовых месторождениях достигал 50 млн. т. руды в год, выемки горной массы, т. е. перемещения пород, связанных с разработкой, — свыше 150 млн. т/год (1990 г.). Всего извлечено и перемещено в Хибинском массиве свыше 1 млрд. м³ пород.

Рисунок 1 показывает масштабы горных работ в Хибинском массиве. Общая площадь горных отводов рудников и карьеров составляет около 10% площади Хибинского массива.

Естественно, что многолетние горные работы в массивах влияют на их облик и состояние, вызывая иногда последствия, которые ранее не предсказывались (в частности, изменения скорости современных движений — повышение сейсмичности), что свидетельствует о необходимости установки мониторинга по специальной программе [1, 2]. Анализ имеющихся данных о сейсмичности Хибин показывает, что большинство землетрясений произошло вблизи действующих рудников и в южной части массива, где расположены крупные хвостохранилища обогатительных фабрик и теплоэлектростанций (рис. 2) [9].

Следует отметить, что само понятие мониторинга применительно к задачам эксплуатации месторождений полезных ископаемых и подземного строительства пока недостаточно отработано. Очевидно, мониторинг горных пород должен быть составной частью более общего понятия литомониторинга, который рассматривается как система наблюдений, оценки, прогноза и управления природно-техногенными изменениями состояния геологической среды [8]. Другие отрасли мониторинга геологической среды — мониторинг территорий, гидротехнических сооружений — продвинулись в этом смысле несколько дальше [8, 6], поскольку подробное описание их содержания и способов осуществления уже выполнено.

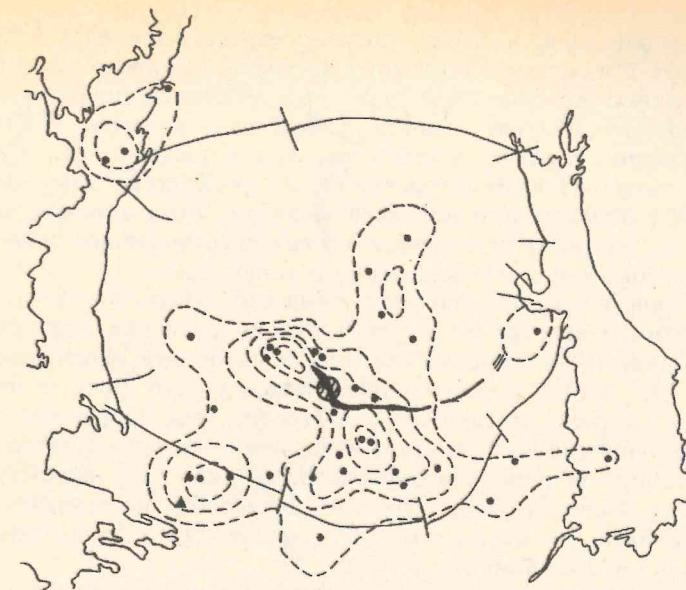


Рис. 2. Проявления сейсмичности в Хибинском массиве (по данным Е. О. Кременецкой, В. Н. Тряпицына [9]): 1 — апатитовое рудное тело; 2 — эпицентры землетрясений; 3 — изолинии плотности землетрясений; 4 — граница Хибинского массива и разломы; 5 — сейсмостанция «Апатиты»; 6 — Кировский рудник

По мнению авторов, взаимоотношение мониторинга массивов горных пород с мониторингом геологической среды в целом должно осуществляться по схеме, приведенной на рис. 3.

Влияние горных работ на состояние геологической среды в предыдущие годы рассматривалось как локальное, не приводящее к ее качественным изменениям, тем более что правилами горных работ предусматривалась рекультивация территорий, нарушенных этими работами [7]. Многолетняя деятельность горных

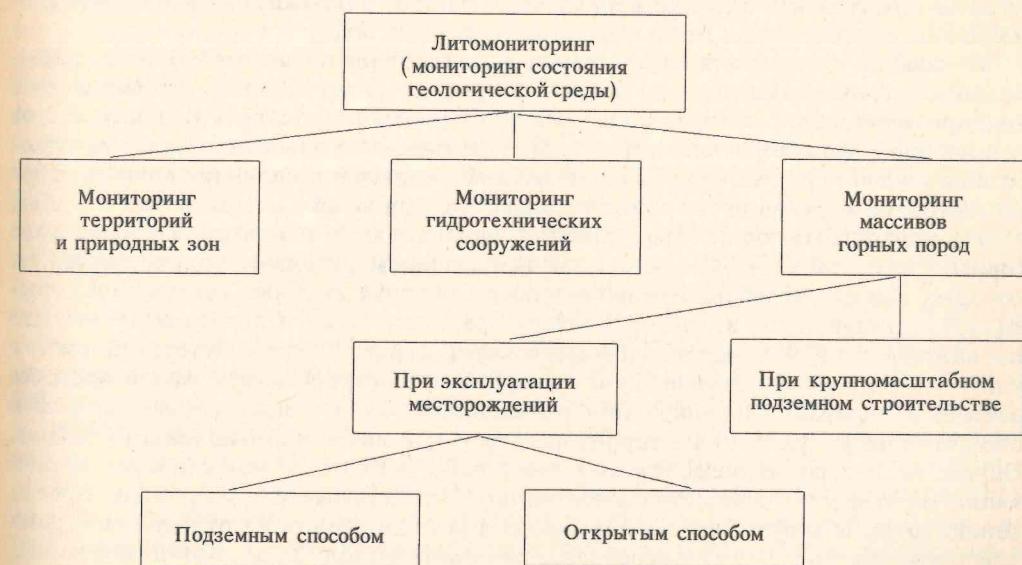


Рис. 3. Схема взаимосвязи мониторинга массивов при ведении горных работ с мониторингом геологической среды

предприятий изменяет эти представления. Количественные изменения переходят в качественные, вызывая изменения состояния массивов, которыми мы, при современном уровне знаний о геологической среде, не в состоянии управлять.

Крупномасштабное воздействие горных работ на состояние Хибинского массива, показанное на рис. 1, является ярким тому подтверждением. В частности, многократное возрастание числа землетрясений в центре Кольского полуострова, в районе Хибинского и Ловозерского массивов, подверженных влиянию крупномасштабных горных работ, позволяет пересмотреть существовавшее ранее представление об этом регионе как о слабосейсмичной территории.

Кольский полуостров, где компактно размещено несколько крупных горнодобывающих предприятий и ведется их многолетняя интенсивная эксплуатация, является удобной моделью для создания системы мониторинга массивов горных пород на весьма отдаленную перспективу. Учитывая, что практически все перечисленные выше предприятия далеко не исчерпали свои природные запасы, предполагается их дальнейшая эксплуатация и развитие. Разведано много других месторождений и рудопроявлений, освоение которых либо уже началось, либо предполагается в ближайшем будущем. Поэтому целесообразно осветить исходные позиции мониторинга, в качестве которых можно было бы использовать существующие на сегодня его элементы.

Специальные систематизированные мониторинговые наблюдения в районах ведения горных работ, а тем более на территории всего Кольского полуострова, до последнего времени не проводились, за исключением отдельных фрагментарных наблюдений. Из наблюдений, реализованных в минувшие годы на территории Кольского полуострова, которые могли бы быть использованы для мониторинга, следует отметить прежде всего исследования по программе Кольского геодинамического полигона [5] (первоначальное название — Кольский геофизический полигон).

Схема Кольского геодинамического полигона периода 1979 г. приведена на рис. 4. Как видно из рисунка, для мониторинговых наблюдений, связанных с влиянием горных работ, могут быть использованы: опорная сейсмическая станция ЕССН России «Апатиты», линии нивелирования 1-го класса, заложенные вблизи г. Апатиты, о которых подробнее будет рассказано ниже, в определенной мере — пункты и результаты наклономерных наблюдений и результаты измерений современных напряжений в массиве горных пород рудников.

Остальные наблюдения по программе Кольского геодинамического полигона — вековые гравиметрические пункты, профили глубинного сейсмического зондирования и др. — направлены в основном на изучение строения и параметров земной коры Кольского полуострова [5]. Программой Кольского геодинамического полигона не предусматривалось комплексное изучение влияния горных работ на состояние верхней части земной коры для территории Кольского полуострова.

На горнодобывающих предприятиях задача учета и контроля воздействия горных работ также не ставилась, за исключением отдельных предприятий, на которых она фрагментарно решалась по инициативе научных организаций, поскольку нормативными актами [7] это не предписывалось. Следует отметить, что на каждом горном предприятии существует строгий маркшейдерский учет и контроль выемки, перемещения и складирования горной массы как в процессе добычи и переработки, так и при размещении отходов производства (хвостов обогатительных фабрик) на территории того или иного промышленного района. Однако исследования воздействия горных работ на состояние и свойства вмещающих горных масс осуществляются только в отдельных случаях. Виды наблюдений, которые могут быть использованы для мониторинга на отдельных горных предприятиях Кольского полуострова, показаны в табл. 2 [3]. Как видно из нее, исследованиями влияния горных работ на окружающие массивы охвачены только рудники АО «Апатит» и АО «Севредмет», на других горнодобывающих предприятиях Мурманской обл. такие исследования не поставлены. Охарак-

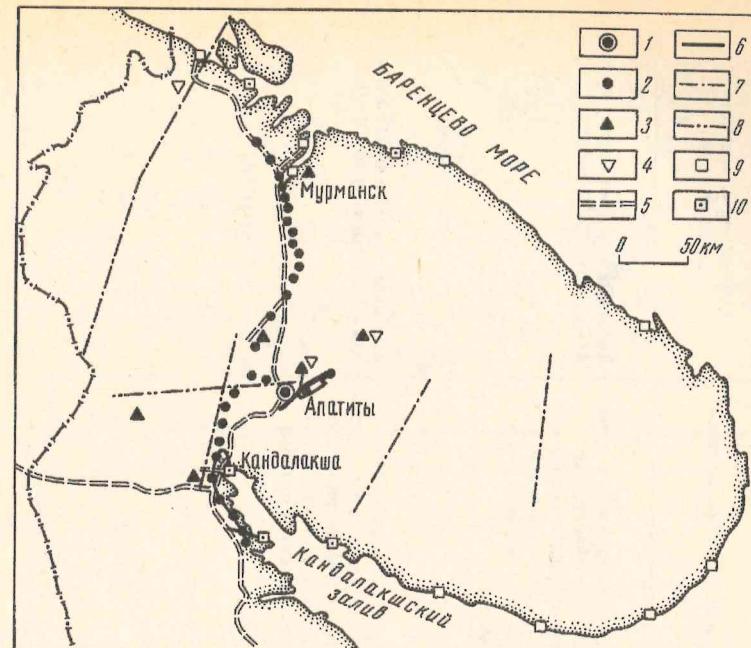


Рис. 4. Кольский геодинамический полигон [5]: 1 — опорная сейсмическая станция ЕССН России «Апатиты» и фундаментальный гравиметрический пункт; 2 — вековые гравиметрические пункты (ВКП); 3 — места земноприливных наклономерных наблюдений; 4 — места измерений современной напряженности горных массивов; 5 — линии государственного нивелирования 1-го класса; 6 — линии нивелирования 1-го класса Кольского геодинамического полигона; 7 — профили глубинного сейсмического зондирования; 8 — сейсморекогносцировочный профиль Ковдор — Кировск; 9 — уровневые посты Мурманского управления гидрометслужбы; 10 — уровневые посты, на которых созданы геодезические микрополигоны

теризуем состояние исследований на рудниках вышеназванных предприятий более подробно.

Горным, Геологическим, а в последнее время и Кольским региональным сейсмологическим центром КНЦ РАН в течение ряда лет осуществляются наблюдения за изменением состояния пород на отдельных участках Хибинского и Ловозерского массивов в районах интенсивного ведения горных работ. В Хибинском массиве развита сеть высокоточных нивелирных наблюдений по трем линиям, закрепленным на местности постоянными знаками: Тик-губа — Кукисумчорр (40 км), Титан — Расвумчорр (13 км), нивелирный полигон Юкспорского туннеля (2,2 км, расположен непосредственно в зоне действия ведущихся подземных и открытых горных работ) [5]. В последние годы к ним добавился подземный нивелирный полигон на гор. +252 м Кировского рудника протяженностью 2,5 км и сооружается нивелирный полигон на гор. +172 м протяженностью 4,5 км. По указанным поверхностным полигонам повторные наблюдения осуществлялись с периодичностью 1 раз в 5 лет (с 1964 г. эти нивелирования проводятся перестали), по Юкспорскому туннелю до 1988 г. наблюдения проводились ежегодно, по подземным нивелирным полигонам — 2 раза в год.

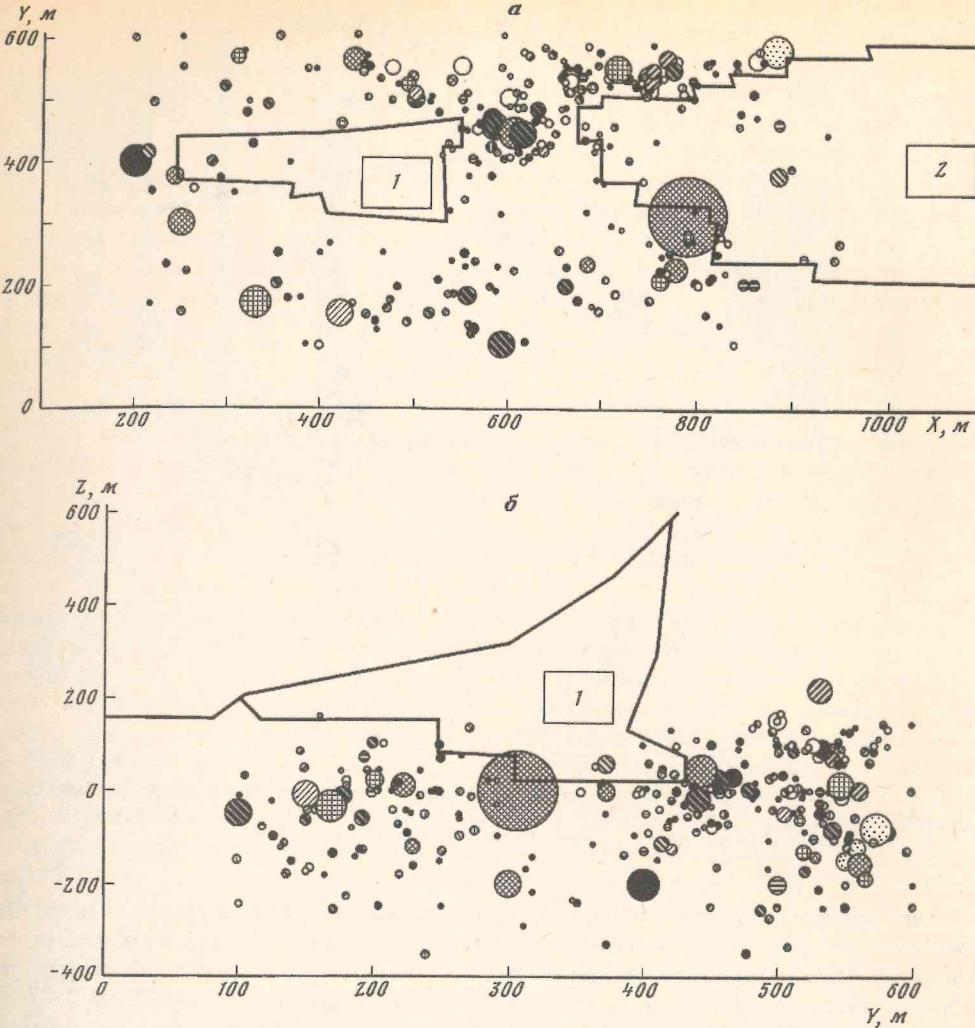
В 1986 г. на Кировском руднике АО «Апатит» оборудована автоматизированная система контроля горного давления, которая регистрирует в непрерывном режиме все значительные сейсмические события в частотном диапазоне до 80 Гц на основном добычном горизонте +252 м рудника; к настоящему времени она модернизирована. В 1993 г. сдана в эксплуатацию подсистема с расширенным частотным диапазоном до 250 Гц на Юкспорском крыле рудника на гор. +460 м. Автоматизированные сейсмические подсистемы созданы с целью регистрации и прогноза горных ударов.

Таблица 2

Характеристика состояния учета и исследований воздействия горных работ отдельных предприятий на окружающие массивы Кольского полуострова

Предприятие	Состав горнодобывающих предприятий	Характер учета и контроля перемещения горной массы и изменения массивов	Характер и состав исследований	Организации, ведущие исследования
АО «Апатит»	2 подземных рудника, 2 рудника с открытыми горными работами	Технологический, исследовательский	Контроль сейсмичности в рудниках и массиве; нивелирные полигоны на поверхности и в рудниках; наклономерно-деформометрические наблюдения в рудниках	Кольский научный центр РАН; АО «Апатит»; ИФЗ РАН
	3 рудника с открытыми горными работами	Технологический	Не ведется	—
АО «Олкон»	2 подземных рудника	Технологический, исследовательский	Нивелирные полигоны на поверхности и в рудниках; наклономерно-деформометрические наблюдения в рудниках; контроль сейсмичности в рудниках	Кольский научный центр РАН; АО «Севредмет»; ИФЗ РАН
	—	—	Не ведется	ВНИМИ
АО «Севредмет»	3 подземных рудника	Технологический	Наблюдения за устойчивостью целиков в подземных условиях	—
	2 рудника с открытыми горными работами	Технологический	То же	—
ГМК «Печорганикель»	1 рудник с открытыми горными работами	Технологический	То же	—
	3 подземных рудника (2 консервируются)	—	—	—
	3 карьера	—	—	—
АО «Ковдорсплод»	—	—	—	—
ГОК «Ковдорсплод»	—	—	—	—
АО «Флогонит»	—	—	—	—

Примечание: Мелкомасштабные участки открытых горных работ при подземных рудниках и предприятиях не учтены.

Рис. 5. Сейсмичность контролируемого участка массива шахтного поля по данным регистрации автоматизированной системой на Кировском руднике за 1990—1993 гг.: кружками разного диаметра обозначены события с энергией $E \cong 10^2 \div 10^{10}$ Дж: а — в плане; б — в разрезе; 1, 2 — соответственно северный и южный фланги

Сейсмичность одного из контролируемых участков Кировского рудника за период времени с 1990 по 1993 гг. представлена на рис. 5. Можно видеть приуроченность проявления сейсмичности к границам ведения очистных работ, особенно к границам стыковочного целика при встречном порядке отработки месторождения.

В г. Апатиты, на удалении 10—20 км от рудников, расположена сейсмическая станция «Апатиты» Единой сети сейсмических наблюдений России. Задачей Станции является регистрация происходящих сейсмических событий, контроль сейсмического режима района (рис. 2).

Наконец, на рудниках АО «Апатит» на глубине 200—600 м от поверхности Горным институтом и рядом других организаций выполняется большой объем наблюдений и измерений напряженно-деформометрических состояний пород различными геомеханическими методами.

В 1990 г. на Кировском руднике АО «Апатит» Горным институтом оборудована на гор. +252 м постоянная станция наклономерно-деформометрических наблюдений, на которой непрерывно осуществляется регистрация процессов в массиве.

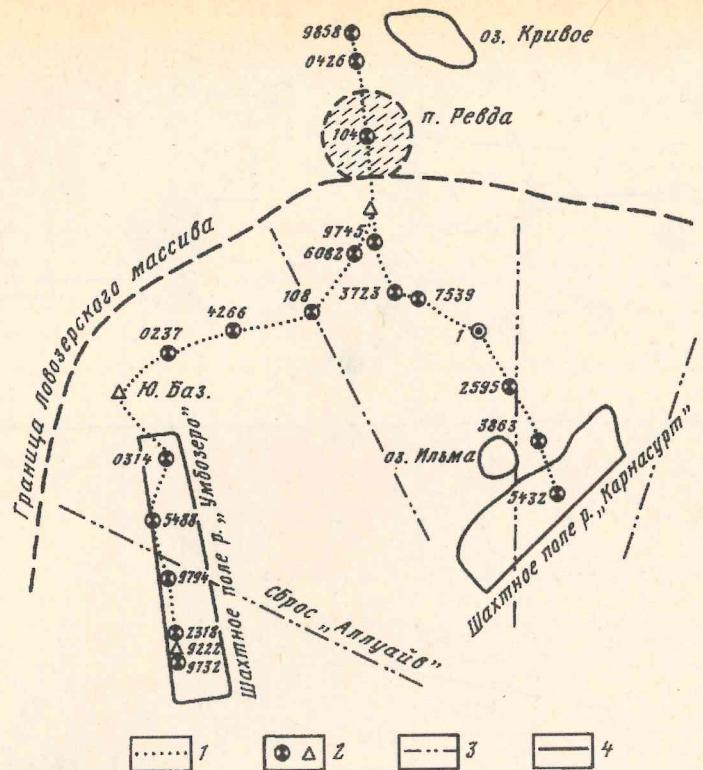


Рис. 6. Схема нивелирного полигона между рудниками «Карна-Сурт» и «Умбозеро» в Ловозерском массиве: 1 — нивелирный полигон; 2 — реперы разных типов; 3 — границы геологических блоков в массиве; 4 — границы шахтных полей рудников

В Ловозерском массиве (рис. 6) заложен поверхностный полигон для высокоточного геометрического нивелирования «Карна-Сурт» — «Умбозеро» (5-й км) протяженностью 26 км. На руднике «Карна-Сурт» по горным выработкам проложено два полигона высокоточного геометрического нивелирования: «Карна-Сурт-1» (гор. +530 м) длиной 1,2 км и «Карна-Сурт-2» (гор. +430 м) длиной 2,2 км. На руднике «Умбозеро» также заложен полигон высокоточного нивелирования «Контрольно-наблюдательный квершлаг» (гор. +290 м) — 0,6 км. Кроме того, на рудниках на глубине 200—300 м от поверхности оборудованы станции непрерывных деформационных (деформометры КД-1, КД-3 с базой 5—20 м) и наклономерных (наклонометры А. Е. Островского, НМДШ, УН-3) наблюдений. Нивелирования по поверхности повторяются с периодичностью 6—7 лет, по подземным полигонам в рудниках 1—2 раза в год, наклономерно-деформометрические наблюдения ведутся непрерывно. На руднике «Умбозеро» также создана автоматизированная подсистема регистрации сейсмических событий в частотном диапазоне до 60 Гц.

Не приводя результаты наблюдений по отдельным полигонам и станциям в Хибинском и Ловозерском массивах, которых к настоящему времени накоплено большое количество, следует выделить некоторые основные тенденции воздействия горных работ на окружающие массивы.

1. Горные работы существенно изменяют ландшафт и геологическую среду горнопромышленных районов в неблагоприятную для обитания людей сторону. При этом вопросам рекультивации и восстановления затронутых горными работами земель на Кольском полуострове уделяется недостаточное внимание. Учитывая возрастание масштабов горных работ по объему и площади без ликвидации их отрицательных воздействий на окружающие массивы, можно

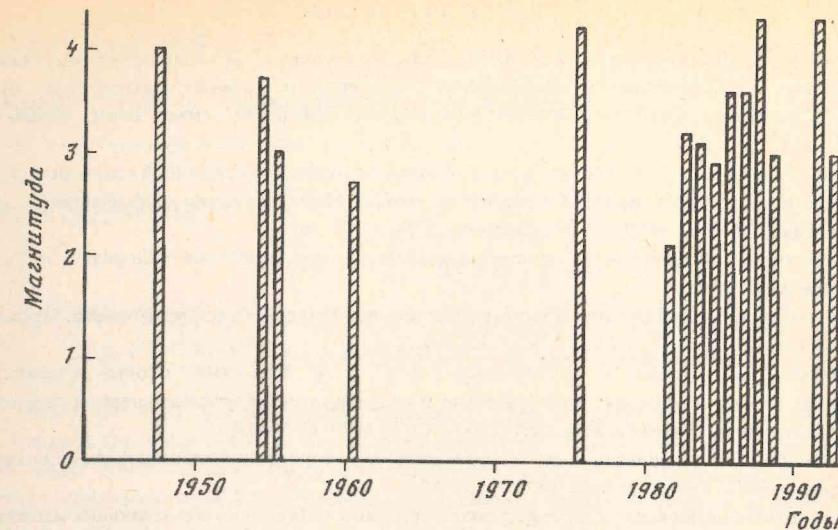


Рис. 7. График регистрации землетрясений в Хибинском массиве за период 1948—1993 гг.

полагать, что в недалеком будущем такие уникальные природные объекты, как Хибинский и Ловозерский массивы, в значительной мере потеряют свои достоинства в качестве привлекательных мест туризма и отдыха.

2. Отрицательное воздействие горных работ проявляется в скрытых формах, в частности в изменении геодинамического режима горнопромышленных районов. В Хибинском массиве, в районе горных работ АО «Апатит», сейсмичность территории за последние годы возросла более чем в 10 раз (рис. 7), что позволяет говорить о решающем влиянии горных работ как дестабилизирующего фактора на ход процессов в пределах рассматриваемого участка земной коры. Последние наблюдения показывают, что аналогичные явления изменения геодинамического режима территории отмечаются и на Ловозерских рудниках.

3. Кольский полуостров не считается сейсмически активным регионом, однако сейсмические события с магнитудой 3—4,5, происходящие в массивах, где ведется отработка месторождений, а зачастую и эпицентры событий располагаются непосредственно вблизи ведущихся горных работ, либо мест расположения хвостохранилищ обогатительных фабрик, что представляет значительную опасность для горнорабочих, а нередко наносят значительный экономический ущерб горным предприятиям и жилым постройкам. Возникает задача усиления контроля за изменением состояния массивов, предсказания мощных сейсмических событий в рудниках. По-видимому, наступило время, когда следует пересмотреть представления о центральной части Кольского полуострова как о слабосейсмичной территории, предусмотреть более детальное сейсморайонирование этой территории с учетом вышеизложенных факторов. По нашему мнению, в настоящее время необходимо поставить вопрос о мониторинге геологической среды во всех горнодобывающих районах Кольского полуострова, так как пока, как это было показано выше, он проводится в недостаточном объеме. Эти наблюдения должны осуществляться по единой программе и методике и во взаимодействии для разных районов региона. Наиболее целесообразно, по-видимому, было бы их осуществлять в рамках общероссийской программы «Мониторинг», в которой Кольский полуостров фигурировал бы наряду с другими горнопромышленными районами и другими ветвями мониторинга природной среды.

Целесообразным представляется также объединить усилия с коллегами из сопредельных стран для выяснения вопросов влияния горных работ на состояние геологической среды и возможных катастрофических последствий этого воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козырев А. А., Ловчиков А. В., Ерухимов А. Х., Панасенко Г. Д. Изменение геодинамической обстановки в Хибинском и Ловозерском массивах в районах разработки месторождений//Симпозиум КАПГ по изучению современных движений земной коры. Воронеж, 1988. С. 135—137.
2. Козырев А. А., Панин В. И. Геомеханические аспекты охраны окружающей среды при разработке полезных ископаемых и подземном строительстве//Х Международная конференция по механике горных пород. М.: Изд. ИГД им. Скочинского. 1994. С. 79—87.
3. Научно-технический прогресс на горнорудных предприятиях Заполярья/Под ред. Г. И. Горбунова. Л.: Наука, 1988. 239 с.
4. Освоение минеральных богатств Кольского полуострова/Под ред. И. А. Турчанинова. Мурманск: Кн. изд-во, 1974. 280 с.
5. Панасенко Г. Д., Бельков И. В., Коломиец А. С. и др. Кольский геодинамический полигон, некоторые итоги и проблемы//Сейсмические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. Апатиты: Изд-во КФ АН СССР, 1979. С. 5—14.
6. Парабучев И. А. Мониторинг процессов взаимодействия гидротехнических сооружений с геологической средой/Инж. геология. № 2. 1992. С. 3—16.
7. Правила технической эксплуатации рудников, приисков и шахт, разрабатывающих месторождения цветных, редких и драгоценных металлов. М.: Недра, 1980. 109 с.
8. Трофимов В. Т., Епишин В. К. Литомониторинг — содержание, структура, роль инженерной геологии в его реализации//Инженерная геология и геологическая среда. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1989. С. 71—78.
9. Тряпицын В. М., Кременецкая Е. О., Черевко В. С., Федоренко Ю. В. Влияние крупномасштабных горных работ на техногенную сейсмичность в блочных массивах//Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1993. С. 76—83.

Горный институт КНЦ РАН

Поступила в редакцию
16. V. 1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 556.3(282.256.346)

© 1996 г. Г. А. КАРНАУХОВА

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТАВ ВОД БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Рассматривается динамика гидрохимического состава Братского водохранилища за весь период его существования. Анализируются такие показатели гидросистемы, как главные ионы, биогенные вещества, растворенные газы и величина pH, тяжелые металлы. Даётся оценка изменений этих показателей под влиянием природно-техногенных факторов.

Химический состав гидросистемы Братского водохранилища формируется в природно-техногенной обстановке, сложившейся в результате создания этого искусственного водоема, приведшего к изменению гидрологических характеристик водного объекта. При наполнении и в первые годы эксплуатации вода получала дополнительные химические элементы за счет взаимодействия с ложем. После прохождения стадии становления гидрохимический режим Братского водохранилища определяют в основном внутриводоемные процессы и внешние факторы. Внутриводоемными процессами являются седimentация, комплексообразование, окислительно-восстановительные процессы, сорбция-десорбция, производование и деструкция органического вещества. К внешним факторам относятся речной сток р. Ангары и ее притоков, литология и геоморфология водосборного бассейна, а также техногенное воздействие, которое началось с момента зарегулирования стока р. Ангары и проявляется в своеобразном режиме эксплуатации ангарских водохранилищ и поступлении в водоем промышленных и хозяйствственно-бытовых сточных вод с дренажируемого бассейна.

Главные ионы. Химический состав гидросистемы Братского водохранилища определяет вышележащее Иркутское водохранилище, питающееся байкальской водой и водами притоков. Вода относится к гидрокарбонатному классу, группе кальция, типу второму, иногда — первому. До создания водохранилища для Ангары были характерны незначительные колебания ее минерализации по длине. Средняя минерализация у Иркутска равнялась 96 мг/л, у г. Братска ниже впадения р. Оки — 118,9 мг/л [1]. Зарегулирование стока обусловило изменения величин минерализации по длине, глубине, сезонам года и в разные по водности годы. Особенно заметно увеличение минерализации на участке г. Иркутск (96,5 мг/л) — с. Олонки (120,75 мг/л) [6]. В самом водохранилище пределы колебания минерализации меньше, чем в реке; разница между его верховым и Приплотинным участком составляет 10,53 мг/л, тогда как между Иркутском и Братском — 35,28 мг/л. Сезонная динамика минерализации воды имеет свои особенности в каждом районе водохранилища; так, в Верхнеангарском районе она обусловлена гидродинамическим режимом рек Ангары, Иркута, Китоя, Белой. Минимальная минерализация (111,5 мг/л) наблюдается в период весеннего половодья, летом она повышается до 119,4 мг/л, осенью составляет 118 мг/л, зимой — 113,1 мг/л. Иное распределение минерализации на Приплотинном участке, где наибольшая ее величина приходится на зимнее время — 130,9 мг/л, весной — несколько ниже (120,4 мг/л), а самые низкие значения минерализации отмечены в летний период (116,5 мг/л).

К ведущим ионам в Братском водохранилище относятся анион HCO_3^- и катион Ca^{2+} , содержание других ионов значительно меньше. Преобладающий анион

HCO_3^- содержится в количестве от 69,54 мг/л в поверхностном слое и 80,52 мг/л в придонном слое воды Долоновского расширения (минимальные для водохранилища значения) до 187,4 мг/л на поверхности и 136,03 мг/л у дна в Калтукском расширении (максимальные значения). К плотине в водохранилище происходит увеличение содержания гидрокарбонатного иона. Ярко выражена вертикальная неоднородность содержания HCO_3^- : с глубиной оно уменьшается; исключение составляют два самых крупных расширения в нижней части водохранилища — Калтукское и Долоновское, где количество гидрокарбонатов ко дну возрастает.

Содержание кальция в воде оз. Байкал и Иркутского водохранилища составляет 14—16 мг/л [4]. Максимальное количество Ca^{2+} в воде Братского водохранилища приходится на разрез у с. Шумилово (24,04 мг/л), минимальное — в поверхностном слое у Падуна (14,43 мг/л). Кальций равномерно распределяется по глубине в районах выклинивания подпора, его содержание составляет 18,04 мг/л по р. Ангаре и 16,03 мг/л по рекам Оке и Ии. По водохранилищу кальций преобладает в поверхностном слое, исключение составляет Заярское расширение и Приплотинный участок, где его количество увеличивается от поверхности ко дну. Предположительно такую ситуацию можно объяснить взаимодействием между водой и затопленными почвами, занимающими большие площади дна в данных районах.

По количеству хлоридов в воде Братское водохранилище превосходит оз. Байкал и Иркутское водохранилище в 5—9 раз. Наиболее высокое значение содержания хлоридов приходится на районы выклинивания подпора, составляя по р. Ангаре 19,03, а по Оке и Ии 15,41 мг/л, что значительно превосходит величины, приводимые Н. В. Верболовой [3] для периода наполнения и первые годы эксплуатации Братского водохранилища. По ангарской ветви водохранилища и на Приплотинном участке хлориды преобладают в поверхностном горизонте воды (до 17,04 мг/л). В Долоновском и Калтукском расширениях наибольшее содержание хлоридов приходится на придонные горизонты.

По р. Ангаре до с. Олонки сохраняется концентрация сульфатов, характерная для оз. Байкал и Иркутского водохранилища, — 5,2 мг/л. По району выклинивания содержание сульфатов снижается до 1—3 мг/л, равномерно распределяясь по глубине. Ниже района выклинивания в самом водохранилище происходит постепенное увеличение сульфатов в 3—5 раз в поверхностном горизонте и в 5—15 раз в придонном слое. По Заярскому расширению и на Приплотинном участке количество сульфатов в воде несколько снижается. Довольно высокой является доля сульфатов в Калтукском (11,3 мг/л) и Долоновском (11,0 мг/л) расширениях, что связано с поступлением окинско-ийских вод, насыщенных сульфатами за счет сброса в реки сточных вод. В Оку сброс сульфатов составляет 3,877 т, в Ию — 5 т [5].

Биогенные вещества. Содержание биогенных веществ в Братском водохранилище определяется их поступлением из Иркутского водохранилища и процессами трансформации в самом Братском водохранилище. В период наполнения и в первые годы эксплуатации водоема большое влияние на содержание биогенных веществ в воде оказывало затопленное ложе (паши, луга, лес, населенные пункты, болота), происходило обогащение воды биогенными веществами за счет выщелачивания почв и разлагающейся растительности.

Анализ количественных показателей аммонийного азота за время существования Братского водохранилища показывает, что главным источником постоянного нахождения NH_4^+ в воде ангарской ветви служат сбросы промышленно-бытовых сточных вод крупных населенных пунктов. Какую-то часть NH_4^+ дает разложение фитопланктона. По окинско-ийской ветви высокие значения аммонийного азота связаны с деятельностью промпредприятий, со сплавом леса по рекам и с влиянием затопленных Шамановских торфяных болот.

Наблюдается увеличение количества аммонийного азота во времени, особенно резкий рост присущ району выклинивания по р. Ангаре. Если в 1964—1966 гг.

содержание NH_4^+ в летнее время в поверхностном слое воды составляло 0,05 мг/л [3], то в 1976—1978 гг., когда уровень воды был низким, — 0,24 мг/л, а в 1984—1986 гг., при высоком уровне, — 0,25 мг/л. По водохранилищу содержание аммонийного азота возросло в 2 раза, на Приплотинном участке в створе Падуна фиксируется 5-кратное увеличение. В отличие от днепровских водохранилищ, где маловодные годы характеризуются высокой концентрацией NH_4^+ в воде, водность Братского водохранилища если и играет роль в насыщенности водной массы NH_4^+ , то подчиненную, а преобладает чисто техногенное воздействие.

Сезонные изменения содержания NH_4^+ прослеживаются на водохранилище с момента его создания. Более высокие концентрации аммонийного азота характерны для весны и осени, особенно заметно повышение NH_4^+ осенью (до 0,25 мг/л) на Приплотинном участке по сравнению с летним (0,05 мг/л). В течение лета количество NH_4^+ на водохранилище относительно невелико, за исключением районов выклинивания и Калтукского расширения, где в течение всего года содержание аммонийного азота остается высоким. Накопление NH_4^+ в летний период несколько выше в придонных слоях воды, что связано с седиментацией продуктов минерализации. Осенью и зимой количество NH_4^+ примерно одинаково по всей глубине, весной более высокие показатели приходятся на поверхностный горизонт, в большей степени это проявляется в нижней части водохранилища, где разница достигает 1,5—2 раз, но в отдельные годы эта разница сглаживается и значения содержания NH_4^+ в поверхностном и придонном горизонтах становятся почти одинаковыми.

Первичную продукцию Братского водохранилища во многом определяет нитратный азот. Существенных годовых различий в количестве нитратного азота на водохранилище не наблюдается. Наибольшие из средних значений содержания NO_3^- на протяжении всех лет приходятся на Заярское расширение, составляя в первые годы после создания водохранилища до 0,2 мг/л, в настоящее время — 0,21 мг/л. Низкие, временами близкие к аналитическому нулю, значения содержания нитратов отмечены в верховых районах выклинивания подпора при смене речного режима на водохранилищный. Исключение составляет участок у г. Свирска, где имеет место значительный рост содержания NO_3^- во времени.

В течение года распределение нитратного азота неравномерно как по акватории водохранилища, так и по сезонам. Минимумы содержания NO_3^- совпадают с вегетационным периодом развития преобладающих на Братском водохранилище диатомовых и синезеленых водорослей, когда нитраты наиболее интенсивно поглощаются фитопланктоном. В первые годы эксплуатации на воде прослеживается один годовой минимум содержания нитратного азота, приходящийся в Верхнеангарском районе на сентябрь, в Балаганском расширении и Ангарском сужении — на июль, в Заярском и Долоновском расширениях — на июль—август, на Приплотинном участке и в Калтукском расширении — на август [3]. Спустя 10 лет после создания водохранилища и по настоящее время на значительной части водохранилища отмечаются 2 минимума содержания нитратного азота, характеризующиеся полным его отсутствием по всему вертикальному сечению. Ниже г. Ангарска, до г. Усолья-Сибирского, первый минимум приходится на июль, второй — на сентябрь. На максимально насыщенном нитратами участке в районе г. Свирска NO_3^- присутствует постоянно, некоторое снижение его содержания отмечается в июне и августе. В Заярском расширении ниже пос. Наратай, в Долоновском и Калтукском расширениях, на Приплотинном участке время наступления минимумов приходится на июль и сентябрь. В то же время один годовой минимум сохранился в Балаганском расширении, Ангарском сужении и части Заярского расширения (~50% общей площади водоема).

Пределы колебаний содержания нитратного азота между минимальным и максимальным значениями по водохранилищу составляют от 0 до 0,45 мг/л. Гораздо выше разница в районах выклинивания и Верхнеангарском районе.

Количество нитратного азота повсеместно увеличивается с глубиной, наибольшие из средних значений приходятся на придонные слои. Наиболее четко такое увеличение прослеживается в летне-осенний период в Балаганском и Заярском расширениях.

Из минеральных форм азота в Братском водохранилище менее заметны нитриты, количество которых в воде колеблется от нулевых значений иногда до сотых, а чаще до тысячных долей мг/л. Содержание NO_2^- снижается постепенно по длине водохранилища. Наибольшее их количество в Верхнеангарском районе отмечается в январе—марте, в Балаганском и Заярском расширениях и в Ангарском сужении — в августе—октябре, в Долоновском и Калтукском расширениях и на Приплотинном участке — в июле—октябре. После наполнения водохранилища по всей его длине отмечалось увеличение количества NO_2^- ко дну в течение всего года с некоторым выравниванием в осенне время. В последующие годы в распределении нитритного азота по толще воды какой-либо закономерности не наблюдается. В 1978—1979 гг. нитритный азот отсутствовал, за исключением Верхнеангарского района (0,01—0,022 мг/л) и Балаганского расширения (0,002—0,029 мг/л). Концентрация минерального фосфора подвержена значительным колебаниям по длине водохранилища, по сезонам года и поглубинно. Наибольшее отличие существует весной между ангарской и ийской ветвями при максимальном содержании фосфатов в поверхностном горизонте Долоновского расширения 0,086 мг/л [2]. Летом (в июне—июле) на участке Иркутск—Аносово количество фосфора падает до аналитического нуля в связи с потреблением его фитопланктоном. На участках Аносово—Братск, Варгалик—Братск, Октябрьский—Братск нулевые значения минерального фосфора приходятся на июль. В августе—сентябре от Иркутска до Аносово количество фосфора в поверхностных горизонтах колеблется от 0,05 до 0,1 мг/л в связи с увеличением минерализации воды остатками отмершего фитопланктона. В придонном слое в этот период времени от верховья водохранилища до с. Шумилово происходит снижение количества фосфора с 0,05—0,1 до 0,005—0,007 мг/л. В Заярском расширении фосфаты преобладают в поверхностных слоях воды (таблица).

За время эксплуатации Братского водохранилища насыщенность воды минеральным фосфором в летнее время увеличивается, в то время как на днепровских водохранилищах произошло его снижение.

В водохранилище, в отличие от речных условий, под влиянием внутриводоемных процессов происходит седиментация железа и накопление его в донных отложениях, что приводит к снижению количества металла в воде водоема. В настоящее время только в районах выклинивания подпора по рекам Ангаре, Оке и Ии сохранилась концентрация железа, близкая к речным, где наблюдаются ее наиболее высокие по водохранилищу значения [6].

Зарегулирование стока р. Ангары сказалось и на содержании железа в воде в течение года. По всему водохранилищу железо присутствует только в октябре, некоторое количество элемента появляется в воде по ангарской акватории в феврале (0,02—0,4 мг/л), в Заярском расширении присутствие железа в феврале в количестве 0,06 мг/л отмечается с 1981 г. В весенний период (в мае) железо появляется в р. Ангаре, в районе выклинивания и в Верхнеангарском районе, на остальной части водохранилища Fe весной отсутствует. Наибольшее количество общего железа в районах выклинивания приходится на февраль и июль (0,6 и 0,55 мг/л) по р. Ангаре, на октябрь (0,125 мг/л) по р. Оке и на июль (0,828 мг/л) по р. Ии.

В летнее время распределение железа в водоеме не отличается равномерностью, на участках выклинивания подпора и в примыкающих к ним районах водохранилища происходит увеличение его количества. В самом водохранилище за счет усиления биологических процессов содержание железа резко снижается, на Приплотинном участке даже до аналитического нуля. Такая неоднородность распределения железа по водохранилищу в один и тот же период времени объяс-

Изменение содержания минерального фосфора в воде Братского водохранилища

Район водохранилища	Содержание минерального фосфора, мг/л *	
	в 1964—1996 гг. (по данным [3])	в 1988—1991 гг. (по данным автора)
Выклинивания подпора по р. Ангаре	0,003 —	0,05—0,1 0,03—0,1
Верхнеангарский район	0,012—0,015 —	0,05—0,1 0,03—0,05
Балаганское расширение	0,012—0,015 —	0,05—0,1 0,03—0,05
Ангарское сужение	0,008 —	<0,01 0,01—0,03
Заярское расширение	0,014 —	0,01—0,03 0,03—0,05
Приплотинный участок	0,001—0,014 0,023—0,043	0,05—0,244 0,162—0,24
Долоновское расширение	0,029 —	0,03—0,1 0,03—0,05
Калтукское расширение	<0,01 —	<0,01 0,03—0,05
Окинский и Ийский районы	—	<0,01 0,01—0,03

* В числителе — содержание фосфора в поверхностном слое воды, в знаменателе — в придонном.

няется не только скоростями деструкционных процессов, но и различием протекания гидродинамических и окислительно-восстановительных процессов.

Растворенные газы и величина pH. Режим растворенных газов в Братском водохранилище формируется под влиянием проточности водоема, ветро-волнового перемешивания водной массы, процесса фотосинтеза в теплое время, контакта воды с донными отложениями и затопленными почвами, образования и минерализации органического вещества, хозяйственной деятельности человека.

Воды р. Ангары на участке от Иркутска до района выклинивания подпора характеризуются высоким содержанием кислорода зимой — 80—100% насыщения, в период открытой воды — 100%, при интенсивном развитии фитопланктона может доходить до 145% насыщения [2]. При сезонном изменении в самом водохранилище наибольшее насыщение кислородом приходится на зимнее время, составляя в среднем за многолетний период 98—107%. В летний период повышение количества растворенного кислорода происходит по направлению к плотине от 9,05—10,44 мг/л в районе г. Свирска и от 8,24—10,62 мг/л у с. Варгалик до 10,39—12,26 мг/л у Падуна. Максимальное содержание растворенного кислорода по ангарской ветви приходится на участок у с. Заярск.

Вертикальное распределение растворенного кислорода характеризуется снижением его количества в придонных слоях, причем на некоторых участках происходит очень резкое его падение. Например, летом 1978 г. у горы Монастырской разница содержаний в поверхностном и придонном горизонтах составила 4,08 мг/л, в Калтукском расширении — 3,7 мг/л, что связано с расходованием O_2 на окислительно-восстановительные процессы, с температурным режимом и

влиянием гидродинамических факторов. Во временном аспекте для Братского водохранилища характерна стабильность содержания растворенного кислорода.

В поступающей в Братское водохранилище ангарской воде количество CO_2 составляет 0,5—2 мг/л, его распределение неравнозначно по акватории водоема, глубине и по сезонам года. Различия в вертикальном распределении CO_2 прослеживаются по всем районам и по времени. Наибольшее количество двуокиси углерода отмечается в придонных слоях за счет разложения органических веществ как в самой воде, так и в илах и затопленной почве. Более низкое насыщение воды CO_2 характерно для районов с переходным гидродинамическим режимом — Верхнеангарского, Окинского, Ийского. Нарастание количества двуокиси углерода происходит по направлению к плотине. Самое высокое содержание CO_2 — в Долоновском расширении, где минимальные значения в поверхностном горизонте (2,5 мг/л) наблюдаются летом, в придонных (5,1 мг/л) — осенью, а максимальные величины CO_2 в поверхностном (4,7 мг/л) и придонном (7,1 мг/л) слоях отмечены весной. Подобное распределение двуокиси углерода в Долоновском расширении наблюдалось в период наполнения и в первые годы эксплуатации водохранилища, но эти значения были более низкими по сравнению с другими районами водохранилища, следовательно, со временем произошло снижение CO_2 на остальной части водоема, что связано, по-видимому, с окончанием процессов разложения органического вещества, поступающего из затопленных почв ложа, а также с перекрытием этих почв донными отложениями, бедными органикой.

Величина рН в водохранилище определяется в основном карбонатным равновесием. Наиболее высокие значения водородных ионов приходятся на районы выклинивания подпора; так, в июне у с. Олонки величина рН в поверхностном горизонте равна 7,66, у с. Буреть — 7,82, в придонном — 7,88 на обоих створах. В самом водохранилище существует тенденция повышения величины рН к плотине. Самые низкие значения рН в Верхнеангарском районе, окинская ветвь Братского водохранилища имеет более высокий показатель рН по сравнению с ангарской ветвью. Наибольшие величины рН наблюдались в период наполнения водохранилища (до 9), распределяясь относительно равномерно по глубине. В период нормальной эксплуатации наибольшее рН и наименьшее из среднегодовых количеств CO_2 приходится на периоды низких стояний уровня воды в водохранилище, длиющиеся по несколько лет, когда в летнее время идет интенсивный процесс фотосинтеза с максимальным потреблением растворенной в воде двуокиси углерода.

Тяжелые металлы. Содержание тяжелых металлов в воде Братского водохранилища определяется привносом их из Иркутского водохранилища и с водой притоков, микроэлементным составом донных отложений и пород, слагающих размываемые береговые уступы, поступлением со сточными промышленными и хозяйствственно-бытовыми водами, сносом с дренируемого бассейна вносимых на поля удобрений.

Ангарская вода имеет невысокие значения содержания марганца — до 7 мкг/л, несколько увеличивающиеся после впадения крупных притоков Иркута и Китоя. Наиболее высокие содержания характерны для районов с переходным (от речного к водохранилищному) режимом — Верхнеангарском, Ийском, Окинском. По сравнению с вышележащим Верхнеангарским районом насыщенность воды в Балаганском расширении, Ангарском сужении и Заярском расширении снижается до 8—9 мкг/л, полностью отсутствует марганец в поверхностном слое по Окинской ветви (Калтукское, Долоновское расширения) и на Приплотинном участке. Существует вертикальная стратификация в нижней части водохранилища, характеризующаяся наибольшими значениями марганца в придонных слоях воды. Так, в Калтукском расширении у дна марганец содержится в количестве 11—15 мкг/л, в Долоновском расширении — 7—8 мкг/л, на Приплотинном участке — до 38 мкг/л. В Ангарском сужении и Балаганском

расширении марганец по вертикали распределяется равномерно. Обратная стратификация характерна для Верхнеангарского, Окинского и Ийского районов, где в поверхностном слое на участке от г. Свирска до с. Казачье марганца содержится от 8 до 66 мкг/л, в придонном — от нуля до 29 мкг/л. В Ийском районе у поверхности количество марганца 10—16 мкг/л, в Окинском — 12 мкг/л; в придонном слое — соответственно 0—12 и 0.

Поведение содержания марганца в районах с переходным режимом контролирует поверхностный слой, включающий в себя речной сток и промышленно-бытовые сбросы, в озеровидных расширениях — внутриводоемные процессы и, в определенной мере, поступающий в водоем материал абразии береговых уступов. Влияние внутриводоемных процессов выражается в появлении максимума содержания марганца в период деструкции биомассы фитопланктона и в увеличении роли донных отложений в поступлении элемента в воду, особенно в период ледостава и летней стагнации. Так, в июне в Балаганском расширении содержание марганца повышается до 46 мкг/л, в Заярском расширении — до 16 мкг/л, что совпадает с максимумом развития диатомовых водорослей, а выпадение их из фитопланктона в августе приводит к нулевым значениям содержания Mn на некоторых участках. Второй максимум фиксируется в Балаганском расширении в феврале и составляет 51 мкг/л. В период открытой воды на водохранилище складываются благоприятные условия для седиментации марганца, мигрирующего в составе взвесей, поскольку снижается его подвижность за счет насыщения воды O_2 и значения рН > 7. Осаджению марганца способствует и значительная степень карбонатности воды.

Одним из наиболее токсичных металлов является медь, которой только в составе сточных вод поступает в Братское водохранилище 4,557 т [5]. В настоящее время идет начальное загрязнение водоема этим металлом, когда уровень его сравнительно невелик, но есть участки, где концентрация меди в донных осадках выше ПДК, что связано с высокой способностью меди к поглощению ее взвешенными веществами и удалению из воды.

Иркутское водохранилище дает 2,1 мкг/л меди, после впадения левых притоков Иркута и Китоя количество меди в Ангаре возрастает примерно в 2 раза. В районе выклинивания подпора после разбавления содержания меди снижается до 1,15—1,5 мкг/л в поверхностном слое и до 0,61—1 мкг/л в придонном. В Верхнеангарском районе и Балаганском расширении появляются значительные по размерам « пятна », где меди содержится 2,83—5,2 мкг/л, как правило, эти « пятна » примыкают к участкам побережий, на которых расположены пашни. Можно предположить, что идет поступление микроэлемента в водоем в составе медьсодержащих удобрений.

Ниже с. Аносово уровни содержания меди снижаются, оставаясь относительно низкими в Ангарском сужении и Заярском расширении. В поверхностных горизонтах количество микроэлемента колеблется от 0,37 до 0,94 мкг/л, а придонных — от 0,3 до 0,61 мкг/л. В Калтукском и Долоновском расширениях поверхностный слой воды содержит 0,94 мкг/л меди, придонный — 1,1—1,48 мкг/л.

Медь активно участвует в процессе вегетации, перераспределяясь между жидкой и твердой фазами водной системы, что способствует уменьшению ее количества в воде. В первых числах июня, до начала вегетации, в верхней части Братского водохранилища содержание меди от поверхности до дна изменялось от 1,17 до 1,07 мкг/л, во время вегетации — от 2,7 до 1,1 мкг/л, в послевегетационный период — от 1,92 до 1,22 мкг/л. Перед плотиной Братской ГЭС в начале июня насыщенность воды медью у поверхности составляла 0,76 мкг/л, у дна — 1,44 мкг/л, а в период активной вегетации — 1,59 мкг/л на поверхности и 2,16 мкг/л в придонных горизонтах. Увеличение содержания меди у дна связано, возможно, с наличием органических соединений, которые выделяют водоросли во время максимума своего развития и последующего разложения.

Распределение цинка по водохранилищу обусловлено особенностями гидродинамического режима отдельных районов и в целом водоема, различием

литолого-геохимического и количественного содержания взвешенных веществ, неодинаковой кислотностью воды и рядом других причин.

На ранних этапах наблюдений за микроэлементами (до 1982 г.) цинк в воде Братского водохранилища отсутствовал, исключение составлял район выклинивания подпора. В настоящее время самые высокие значения содержания цинка находятся на участке от пос. Боково (ниже сброса авиазавода) до пос. Ка-менка, а также до пос. Омский в Окинском районе и до пос. Варгалик и Ийском районе.

Вода в районе о-ва Юность в г. Иркутске содержит 7 мкг/л цинка. В формировании режима цинка по ангарской ветви водохранилища принимают участие р. Иркут (8 мкг/л) и Китой (12 мкг/л), по окинско-ийской ветви реки Ока (в поверхностном слое 11,5 и 18,7 мкг/л у дна) и Ия (в поверхностном слое 11,5 и 14 мкг/л у дна). В районах выклинивания подпора при уменьшении транспортирующей способности потока происходит седimentация цинка в составе взвесей, на что указывает возрастание концентрации элемента от поверхности ко дну. В Верхнеангарском районе поверхностный слой воды содержит 7,66 мкг/л, придонный — 18,3 мкг/л, в Окинском районе количество цинка у поверхности составляет 7,37, у дна — 19,82 мкг/л.

В самом водохранилище распределение цинка по глубине аналогично рассмотренному выше, чаще всего в поверхностном слое цинк отсутствует, в Заярском расширении элемент отмечен в виде следов, в придонных же слоях его содержится 3,1—8,3 мкг/л. В Долоновском и Калтукском расширениях в придонном слое цинк находится в пределах 3—10 мкг/л.

Удаление цинка из воды и закрепление его в донных отложениях особенно четко прослеживается в Балаганском расширении Братского водохранилища в период максимального цветения водорослей, когда сокращение содержания в воде CO_2 вызывает осаждение кальцита, приводящее к интенсивному осаждению цинка совместно с карбонатами [6].

В гидросистеме Братского водохранилища до 1983 г. свинец не наблюдался, его присутствие фиксировалось только по р. Ангаре и району выклинивания подпора в летне-осенне время в количестве 0,005—0,012 мкг/л. В последующие годы в воде р. Ангары у о-ва Юность отмечено 0,7 мкг/л свинца. Это количество металла сохраняется на речном участке, повышаясь в районе выклинивания подпора, что связано с поступлением его от промышленных предприятий. В поверхностном горизонте воды района содержится 6,8—10,5 мкг/л свинца, в придонном — от 5,55 до 8,77 мкг/л. Концентрация свинца в воде водохранилища, как правило, не превышает 10 мкг/л при $\text{pH} \rightarrow 8$ и достаточном количестве двуокиси углерода в растворе. Наибольшее из наблюденных значений приходится на участок между г. Свирском и пос. Казачье, где происходит увеличение свинца ко дну (от 5—6 до 6,13—11,23 мкг/л). Равномерное распределение свинца по вертикали характерно для Балаганского расширения (0,14—0,18 мкг/л), Ангарского сужения (0,199—0,21 мкг/л). В Заярском расширении отмечается полное отсутствие свинца у дна при 0,08—0,12 мкг/л у поверхности. Окинская вода насыщена в пределах от 0,098—0,146 мкг/л в поверхностном горизонте до 0,182—0,269 мкг/л у дна. Ийские воды имеют в поверхностном слое 0,09—0,269, в придонном 0,15—0,337 мкг/л. При смешивании окинско-ийских вод с ангарскими наибольшее количество свинца оказывается в верхних слоях воды — 0,291—0,406 мкг/л, у дна — 0,173—0,256 мкг/л.

Выводы

1. Техногенные факторы, связанные с хозяйственной деятельностью, обуславливают количественные и качественные изменения содержаний тяжелых металлов в воде. Широко распространены марганец и медь, значительные количества которых отмечаются в районах выклинивания подпора и на сопряженных с ними участках водохранилища. Появление цинка и свинца в воде водохранилища

отмечено с 1983 г., и содержание их имеет тенденцию к увеличению. Под влиянием внутриводоемных процессов происходит осаждение и накопление железа в донных осадках водохранилища, что приводит к снижению его количества в воде.

2. В воде водохранилища в процессе его эксплуатации накапливаются биогенные вещества. За 30 лет количество аммонийного азота в р. Ангаре увеличилось в 5 раз, в водохранилище — в 2 раза. Содержание других форм минерального азота (нитратного, нитритного) остается неизменным. Концентрация минерально-го фосфора в р. Ангаре возросла в 15—30 раз, в водохранилище — в 3—7 раз.

3. Насыщенность воды водохранилища двуокисью углерода снизилась в 1,5 раза. В летний период разложение органических веществ приводит к накоплению CO_2 в придонных слоях воды. Для периодов низких уровней воды в водохранилище характерны наименьшие значения двуокиси углерода и наибольшие — показателя pH . Величина pH по окинской ветви водохранилища выше, чем по ангарской, в связи с затоплением больших массивов Шаманских болот.

4. Создание водохранилища сказалось на минерализации воды, которая возросла на 12,4 мг/л. Стабильными за время существования Братского водохранилища остались преобладающие ионы — HCO_3^- и Ca^{2+} . Содержание хлоридов в воде повысилось в 4 раза, сульфатов — в 1,5—2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкирев П. Ф. Гидрохимия рек Восточной Сибири. Иркутск: Иркутское кн. изд-во, 1959. 155 с.
2. Братское водохранилище/Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 166 с.
3. Верболова Н. В. Формирование гидрохимического режима Братского водохранилища// Формирование планктона и гидрохимия Братского водохранилища. Новосибирск: Наука, 1973. С. 78—118.
4. Вотинцев К. К. Гидрохимия озера Байкал//Тр. Байкальск. лимнол. ст., 1961. Т. 20. 311 с.
5. Ежегодный доклад «Экологическая обстановка в Иркутской области в 1992 г.». Иркутск: Лисна, 1993. 142 с.
6. Карнаухова Г. А. Изменение донных отложений и водной среды в зоне выклинивания подпора Братского водохранилища при техногенном воздействии//География и природ. ресурсы. 1992. № 1. С. 44—49.

Институт земной коры СО РАН

Поступила в редакцию
9.III.1995

УДК 621.039.73 : 669.712

© 1996 г. Б. И. РЫЖОВ, Б. А. БОГАТЫРЕВ, Н. Д. ШИКИНА

СОРБЦИЯ СТРОНЦИЯ И ЦЕЗИЯ КРАСНЫМИ ШЛАМАМИ И ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАО

Проведены экспериментальные исследования по сорбции в статическом режиме Sr и Cs красным шламом, являющимся отходом при переработке бокситовых руд по способу Байера. Установлено, что для Sr красный шлам является одним из лучших минеральных сорбентов. Сорбционная емкость его по Sr (420 ± 24 мг-экв/100 г) превышает таковую бентонитовых глин (80–100 мг-экв/100 г) и цеолитов (200 мг-экв/100 г). Сорбция цезия красным шламом оказалась незначительной. Красный шлам может быть рекомендован в качестве потенциального сорбента при сооружении сорбционных барьеров в хранилищах радиоактивных отходов (РАО).

Введение

Радиоактивные изотопы стронция (^{90}Sr) и цезия (^{137}Cs) являются распространеными, долгоживущими и опасными (токсичными) элементами в отходах радиохимических заводов. Они часто преобладают среди продуктов радиоактивного заражения территорий. Специфическая особенность ^{90}Sr и ^{137}Cs — их высокая миграционная способность. Кроме того, они характеризуются высокими радиоактивностью и тепловыделением. Требования по допустимому содержанию Sr и Cs в воде, по сравнению с другими радионуклидами, наиболее жесткие: так, предельно допустимая концентрация (ПДК) ^{90}Sr составляет всего $2 \cdot 10^{-12}$ г/л, а ^{137}Cs — $2 \cdot 10^{-10}$ г/л. Для сравнения укажем, что ПДК урана — $4 \cdot 10^{-6}$ г/л [4]. Вследствие этого подбор материалов, эффективно сорбирующих стронций и цезий, является одной из главных задач при выборе способа захоронения РАО. Изучение распределения урана в глинистых породах гидрогенных месторождений методом осколковой радиографии показывает, что уран в них сорбирован не глинистыми минералами, а поверхностью частиц оксигидроксидов Fe, Al, Ti. Известно, что одним из наиболее богатых оксигидроксидами Fe, Al, Ti материалов является красный шлам, отходы глиноземного производства. Их использование в качестве сорбентов было бы весьма желательно.

Красные шламы в изобилии (десятки миллионов тонн) скопились в шламохранилищах вблизи глиноземных заводов. В районах размещения шламохранилищ экологическая обстановка считается неблагоприятной. Главным фактором отрицательного влияния на окружающую среду является высокая щелочность красных шламов и их сильное пыление. Загрязняются не только поверхностные, но и грунтовые воды вследствие утечек из шламохранилищ через дамбы и боковые породы, а также из шламоводов и водоводов. В районе действующих предприятий загрязнение вод щелочами превышает ПДК в десятки раз. Осушенные и старые шламохранилища пылят на многие километры вокруг предприятий. ПДК пыли для шламохранилищ не устанавливаются, а меры борьбы с пылением на действующих предприятиях, как правило, не предусматриваются. Широкомасштабное использование красных шламов улучшило бы экологическую обстановку в этих регионах.

В. И. Корнеев и др. [3] приводят следующий средний состав красных шламов Богословского и Уральского алюминиевых заводов за последние 10 лет их работы,

Таблица 1

Извлечение из шлама исходных (фоновых) Cs и Sr дистиллированной водой (холостой опыт)

Время контакта	Cs, %	Sr, %
22 ч	$8 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
4 сут	$8 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1,4 \cdot 10^{-6}$
8 сут	$7 \cdot 10^{-7}$	$< 1,4 \cdot 10^{-6}$
40 сут	$8 \cdot 10^{-7}$	

вес. %: SiO_2 7–12, Al_2O_3 12–15, Fe_2O_3 38–52, CaO 10–14, TiO_2 4–5, Na_2O 3–5, прочие (S, P, V, Cr) 2–8.

Шлам состоит из двух частей: остаточных природных минералов, в той или иной степени измененных при переработке бокситовых руд, и новообразованных техногенных фаз.

Остаточные природные фазы представлены оксигидроксидами Fe, Al, Ti, которые при байеровском процессе практически сохраняются, хотя частично диспергируются и аморфизуются. В шламах Уральского завода присутствуют также шамозит и хлорит.

В техногенных новообразованных фазах установлены гидроалюмосиликаты натрия каркасного строения, подобные природным содалиту, нозеану и канкриниту. Для их структур характерны каналы и крупные четырех-, шести- и восьмичленные кольца размером 1,14 и 0,66 нм, в которые могут входить катионы щелочных и щелочноземельных элементов [3]. Широким распространением пользуются рентгеноаморфные продукты — гели алюминия, железа и, вероятно, кремния и титана, а также титанаты Na и Ca.

По данным В. Я. Абрамова и др. [1], красные шламы обладают высокой дисперсностью и большой удельной поверхностью — 23–25 м²/г. Плотность их 3,3–3,4 г/см³, температура плавления 1350–1370° С, пластичность хорошая, водопоглощение при полусухом прессовании 12–15%, pH среды шлама 11–13. Коэффициент фильтрации шлама колеблется от 10^{-2} см/с в ограждающих шламохранилища дамбах до 10^{-6} – 10^{-7} см/с в прудовой зоне. Высокая дисперсность шламов, вероятно, является причиной их низкой фильтруемости и плохой смачиваемости. Данные о сорбционной емкости красных шламов в литературе отсутствуют.

Методика экспериментов

Для оценки сорбционных параметров красных шламов по отношению к Sr и Cs была проведена серия экспериментальных исследований. В качестве сорбента использовался образец сухого шлама байеровской линии Уральского алюминиевого завода. В связи с плохой смачиваемостью тонких фракций красного шлама и образованием из-за этого не размокающих в воде комочеков использовалась относительно крупнозернистая фракция (0,1–0,25 мм). Основой для расчета сорбционных параметров служили замеры изменений начальных концентраций солей Cs и Sr в водных растворах после контакта их с навеской исследуемого образца.

Методика работы сводилась к следующему. Навеску шлама (0,3 г) помещали в эrlenmeyerовскую колбу и заливали 50 мл раствора, содержащего определенное количество Sr или Cs (исходный раствор). Равновесие достигалось примерно за 10 сут. Опыты длились от 14 до 41 сут. После этого раствор отфильтровывали через бумажный фильтр синяя лента и анализировали на Sr или Cs. Содержание Sr и Cs в исходных и равновесных (конечных) растворах определялось методом атомно-

Таблица 3

Десорбция Sr из красного шлама (трехкратная) дистиллированной водой

№ опыта	Сорбция Sr (время контакта 2,5 мес)			Десорбция-1 (2мес)	Десорбция-2 (2,5мес)	Десорбция-3 (2мес)
	исходный раствор, %	раствор после сорбции, %	сорб. мг-экв/100 г	мг-экв/100 г шлама		
1	$5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	19	—	—	—
2	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	19	0,7	1,7	0,2
3	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	19	0,9	1,9	0,1
4	$5 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	19	1,3	1,8	0,1
				Среднее 1,0	Среднее 1,8	
5	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	106	3,4	6,96	0,7
6	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	106	3,8	6,68	0,6
7	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	104	4,7	6,90	0,6
8	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	105	3,6	5,40	0,9
				Среднее 4,0	Среднее 6,5	

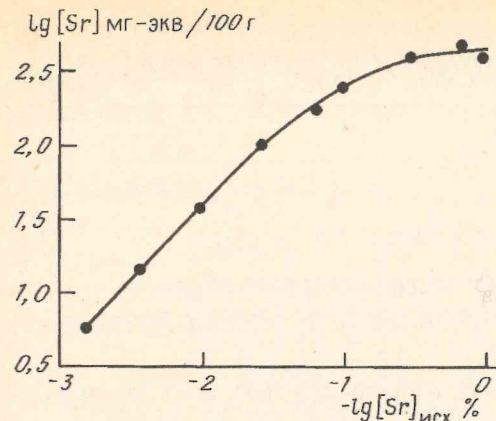


Рис. 1. Изотерма сорбции Sr красным шламом

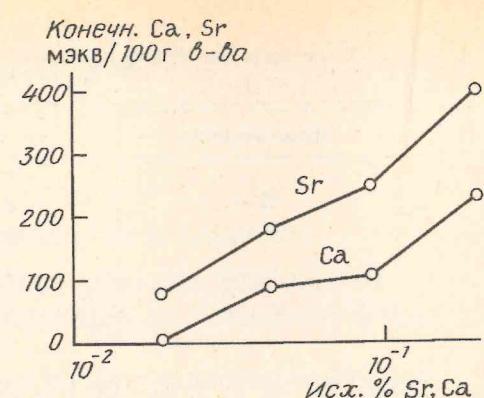


Рис. 2. Корреляция величин сорбции Sr красным шламом и извлечения Ca из шлама

адсорбционной спектрофотометрии (аналитик Л. Ф. Карташова). Для определения исходных (фоновых) содержаний Sr и Cs в красном шламе проведены опыты по извлечению этих элементов из шлама дистиллированной водой. Длительность контакта воды с твердой фазой составляла от 22 ч до 40 сут. Установлено, что фоновое содержание Cs ($7-8 \cdot 10^{-7}$, а Sr — $1,4 \cdot 10^{-6}\%$ (табл. 1).

Результаты экспериментов

Фактический материал результатов исследований приведен в таблицах 2—7 и на рисунках 1—3.

Полученные данные указывают на очень интенсивную сорбцию Sr образцом красного шлама. Максимальная сорбционная емкость красного шлама по Sr составляет 420 ± 24 мг-экв/100 г, что значительно превышает емкость бентонитовых глин (80—150 мг-экв/100 г) и даже цеолитов (200 мг-экв/100 г). В трех

Таблица 2

Сорбция Sr из растворов различной концентрации

Концентрация Sr в растворе, %	Число опытов	Сорбция Sr, мг-экв/100 г вещества	K_d	pH	
				исходная	конечная
$7,35 \cdot 10^{-1}$	$6,10 \cdot 10^{-1}$	1	475	28	5,04
$2,94 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	1	396	91	
$9,7 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	1	244	323	5,85
$6,25 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	1	179	505	
$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	1	112	16839	6,36
$(2,56 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$	$(1,53 \pm 0,48) \cdot 10^{-4}$	3	97 ± 1	33485 ± 10291	8,85
$(3,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	$(2,57 \pm 0,4) \cdot 10^{-5}$	3	$14 \pm 0,5$	24127 ± 3800	6,57
$(1,57 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$	$(4,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$	2			8,94
$6,1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	1			6,66
$9,0 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$	1			8,92
Фон $\leqslant 1,4 \cdot 10^{-6}$					6,71
					9,08
					6,76
					9,81

Таблица 4
Соотношение количеств сорбированного твердой фазой (красный шлам) Sr²⁺ и перешедшего из шлама в раствор Ca²⁺

Sr исх, %	Сорбция			Выход Ca		Отношение Sr/Ca
	конеч., %	сорбование твердой фазой, %	мг-экв/100 г	г/мл	мг-экв/100 г вещества	
$2,94 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	396	$2,68 \cdot 10^{-4}$	223	1,77
$9,55 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$6,54 \cdot 10^{-2}$	245	$1,30 \cdot 10^{-4}$	108	2,27
$6,25 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$4,70 \cdot 10^{-2}$	179	$1,07 \cdot 10^{-4}$	89	2,01
$2,77 \cdot 10^{-2}$	$5,58 \cdot 10^{-4}$	Практически все	103	$7,48 \cdot 10^{-6}$	6	17,17

последних опытах практически весь Sr удален из растворов и остаточные (равновесные) концентрации его в растворах соизмеримы с фоновым содержанием. При содержаниях Sr в исходных растворах $(1,57 \pm 0,33) \cdot 10^{-3}\%$ и ниже в конечных растворах Sr не обнаружен. K_d Sr с уменьшением концентрации исходных растворов возрастает от 28 до нескольких тысяч (табл. 2, рис. 1).

Выборочно проведены опыты по десорбции Sr из шламов, насыщенных Sr в предыдущих опытах по сорбции. Для растворов с начальными концентрациями Sr $5 \cdot 10^{-3}$ и $2,8 \cdot 10^{-2}\%$ значения величины сорбции составили соответственно 19 и 105 мг-экв/100 г шлама, а десорбции — 1 и 4 мг-экв/100 г шлама (табл. 3).

Для определения сорбирующей Sr минеральной фазы красного шлама проведены измерения в Sr-содержащих растворах содержания Ca, извлекаемого в ходе опытов из шлама. Установлено, что чем больше сорбируется красным шламом Sr, тем больше переходит в раствор Ca (табл. 4, рис. 2). В используемых для опытов красных шламах А. В. Сивцов с помощью электронного микроскопа JEM-1000C с

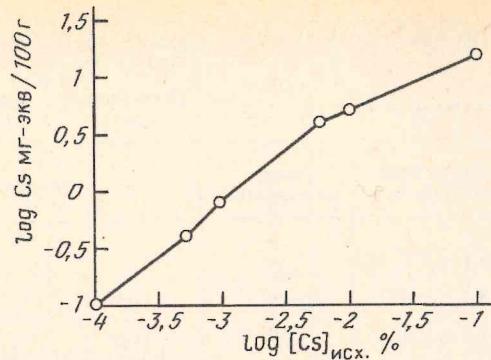


Рис. 3. Сорбция Cs красным шламом из растворов различной концентрации

энергодисперсионной приставкой «Kevex» установил цеолитоподобную фазу с главными компонентами Si, Al, Na и примесью Ca.

В ходе опытов pH Sr-содержащих растворов повышалось с 5,8—6,8 в исходных растворах до 7,6—9,8 в конечных (равновесных) растворах; pH равновесных конечных растворов определяется природой сорбируемых катионов и щелочным характером красного шлама.

Таблица 5

Сорбция Cs из растворов различной концентрации

Концентрация Cs в растворе, %		Сорбция Cs, мг-экв/100 г вещества	K_d	pH	
исходная	конечная			исходный	конечный
$1,0 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-2}$	16	24		
$9,95 \cdot 10^{-3}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$	5,1	115	6,63	9,25
$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	4,0	194		
$9,6 \cdot 10^{-4}$	$3,25 \cdot 10^{-4}$	0,8	326	6,61	9,18
$5,2 \cdot 10^{-4}$	$1,80 \cdot 10^{-4}$	0,4	329		
$1 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,1	528	6,63	9,31

Таблица 6

Результаты контроля возможного соосаждения Cs из растворов при коагуляции коллоидов

исходная	Концентрация Cs	
	до коагуляции	после коагуляции
$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
$(5,0 \pm 0,9) \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
$(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
$(5,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$

Таблица 7
Результаты опытов по сорбции Sr и Cs красным шламом из монокомпонентных растворов и растворов с солевым фоном (Ca, Mg, Na)

С солевым фоном					
С дистиллированной H ₂ O					
Sr					
Cs					
исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %
7,4 · 10 ⁻¹	6,1 · 10 ⁻¹	475	7,8 · 10 ⁻¹	6,6 · 10 ⁻¹	456
3 · 10 ⁻¹	1,9 · 10 ⁻¹	420 ± 24	99 ± 8	2,4 · 10 ⁻¹	2,1 · 10 ⁻¹
9,7 · 10 ⁻²	3,3 · 10 ⁻²	244	323	9,2 · 10 ⁻²	9,1 · 10 ⁻²
2,6 · 10 ⁻²	(1,5 ± 0,5) · 10 ⁻⁴	97 ± 1	33485 ± 10291	1,3 · 10 ⁻²	1,2 · 10 ⁻²
(3,7 ± 0,4) · 10 ⁻⁵	(2,6 ± 0,4) · 10 ⁻⁵	14 ± 0,5	21127 ± 3800	3,8 · 10 ⁻³	3,2 · 10 ⁻³
исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %
3,3 · 10 ⁻²	6 · 10 ⁻²	8,8 · 10 ⁻³	9,5 · 10 ⁻³	—	—
2,9 · 10 ⁻²	5,6 · 10 ⁻²	1,1 · 10 ⁻²	9,8 · 10 ⁻³	1,7	23
2,8 · 10 ⁻²	5,6 · 10 ⁻²	3,4 · 10 ⁻³	2,8 · 10 ⁻³	0,8	40
2,8 · 10 ⁻²	5,4 · 10 ⁻²	1,1 · 10 ⁻³	7,6 · 10 ⁻⁴	0,4	69
2,8 · 10 ⁻²	5,4 · 10 ⁻²	1,1 · 10 ⁻³	8 · 10 ⁻⁴	0,4	72
исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %
6,2 · 10 ⁻³	6 · 10 ⁻³	1,1 · 10 ⁻²	1,1 · 10 ⁻²	6,2 · 10 ⁻³	6
2,6 · 10 ⁻³	3 · 10 ⁻³	5,0 · 10 ⁻³	5,0 · 10 ⁻³	2,6 · 10 ⁻³	153
3,3 · 10 ⁻⁴	1 · 10 ⁻³	1,1 · 10 ⁻³	1,1 · 10 ⁻³	3,3 · 10 ⁻⁴	363
исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %	исх., %	конеч., %

Сорбция красным шламом Sr идет заметно слабее, чем Sr. Максимальные значения сорбционной емкости по Cs не достигнуты, но, по-видимому, они на порядок или два ниже, чем для Sr (рис. 3, табл. 5). В Cs-содержащих растворах, отфильтрованных от твердой фазы, через некоторое время наблюдали коагуляцию коллоидного материала. Для выяснения сорбционной емкости последнего проведено определение содержания цезия в конечных растворах до и после момента коагуляции. Полученные данные (табл. 6) показывают, что сорбции цезия коллоидом не происходит. В аморфном осадке, прошедшем через фильтр, цезий не установлен. При электронно-микроскопическом изучении осадка установлено, что он имеет почти исключительно глиноземный состав.

Экспериментально исследовано влияние солевого состава (Na, Ca, Mg) на сорбцию Sr и Cs красным шламом из водных растворов, по катионному составу примерно соответствующих природным водам в районе предприятия «Маяк». В исходных растворах содержание примесей было следующим, %: Ca — $(1,5—2) \cdot 10^{-1}$; Mg — $(5,6—8,5) \cdot 10^{-1}$; Na — $(2,8—3) \cdot 10^{-2}$. Содержания стронция менялись от $4 \cdot 10^{-3}$ до $8 \cdot 10^{-1}\%$, а Cs — от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1,1 \cdot 10^{-2}\%$ (табл. 7). Установлено, что при высоком содержании Sr в исходном растворе ($7 \cdot 10^{-1}\%$) присутствие в растворе Ca, Mg, Na в указанных выше количествах на максимальную сорбционную емкость заметного влияния не оказывает. С понижением содержания Sr в исходных растворах до $4 \cdot 10^{-3}\%$ сорбционная емкость шлама резко падает и составляет всего 2 мг-экв/100 г вещества, что в 7 раз меньше, чем при сорбции из монокомпонентного раствора. Сорбция цезия изучалась в меньшем интервале содержаний Cs в исходных растворах, чем Sr. В присутствии в растворе Ca, Mg, Na сорбция Cs красным шламом не установлена. Сорбция Sr и Cs из растворов с солевым фоном сопровождалась незначительным уменьшением содержания Mg и уменьшением Na.

Заключение

1. Проведенными экспериментальными исследованиями выявлены высокие значения сорбционной емкости красного шлама по Sr и K_d Sr, позволяющие отнести этот материал к эффективным сорбентам на Sr. Сорбционные свойства красного шлама обусловлены преимущественно следующими причинами: большим содержанием в нем амфотерных оксигидроксидов железа; щелочным характером шлама, способствующим образованию плохо растворимых гидроксидных фаз Sr; наличием аморфных фаз и минеральных фаз, обладающих структурными цеолитоподобными каналами. Вероятно, извлечение Sr из растворов обусловлено не только сорбией, но и химическим осаждением в виде малорастворимых соединений (гидроксид, карбонат). Во всяком случае, электронной микроскопией в красных шламах выявлена самостоятельная минеральная фаза стронция, представленная, по-видимому, оксигидроксидом стронция, а также упомянутая выше цеолитоподобная фаза, в составе которой в качестве главных компонентов установлены Si, Al, Na и примесь Ca. Образование этих фаз способствует щелочная среда, создаваемая красными шламами. Это не исключает сорбцию стронция другими минеральными фазами.

2. Опыты показали, что красные шламы Cs практически не сорбируют.

Практические рекомендации

1. Высокие селективные на Sr сорбционные свойства красного шлама позволяют рекомендовать его в качестве сорбента при устройстве техногенных барьеров в могильниках РАО, как поверхностных, так и глубокого захоронения.

2. Красный шлам может быть использован при поверхностной дезактивации загрязненных территорий.

3. Возможно использование красного шлама при устройстве городских свалок в качестве сорбента на Sr (и, вероятно, тяжелые металлы).

4. В качестве защитного материала возможно использование композитных смесей красного шлама с бентонитовыми глинами и цеолитами, а также изготовление специальных бетонов с добавкой красного шлама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов В. Я., Стальмакова Г. Д., Николаев И. В. Физико-химические основы комплексной переработки алюминиевого сырья (щелочные способы). М.: Металлургия, 1985. 288 с.
2. Жаброва Г. М., Егоров Е. В. // Успехи химии. 1961. Т. 30. С. 764.
3. Корнеев В. И., Сусс А. Г., Цеховой А. И. Красные шламы. М.: Металлургия, 1991. 144 с.
4. Krauskopf K. B. Radioactive Waste Deposit and Geology//L.; N. Y.; Chapman and Hall, 1988. P. 145.

ИГЕМ

Поступила в редакцию
10.II.1995

УДК 621.039.7

© 1996 г. С. В. СТЕФАНОВСКИЙ, С. В. ЮДИНЦЕВ, Б. С. НИКОНОВ,
Б. И. ОМЕЛЬЯНЕНКО

ИЗУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛА СИНРОК

Изучены керамические материалы СИНРОК-Б и СИНРОК-С, синтезированные методом индукционного плавления в холодном тигле. Установлено, что СИНРОК-Б, так же как и его зарубежный прототип, состоит из цирконолита, голландита, перовскита и рутила. СИНРОК-С содержит все эти фазы, а также примесь повеллита. Определены составы минералов и особенности распределения элементов — имитаторов радионуклидов между ними. Cs локализован в голландите, Ce и Nd — в цирконолите и перовските, Sr в основном сосредоточен в перовските. При наличии повеллита на этот минерал приходится значительная часть Sr и Cs, а также все количество Mo. Его присутствие в СИНРОКе является нежелательным из-за высокой растворимости в подземных водах.

Введение

Безопасность захоронения высокоактивных отходов в недрах Земли в значительной степени зависит от надежности инженерных защитных сооружений могильника, в том числе от устойчивости форм нахождения (матриц) отходов. В настоящее время в качестве матриц используют боросиликатные или алюмофосфатные стекла. Стекла термодинамически нестабильны и со временем раскристаллизовываются с образованием агрегатов минеральных фаз. При этом часть радионуклидов, не вошедших в новообразованные минералы, может быть выщелочена подземными водами и вынесена в биосферу.

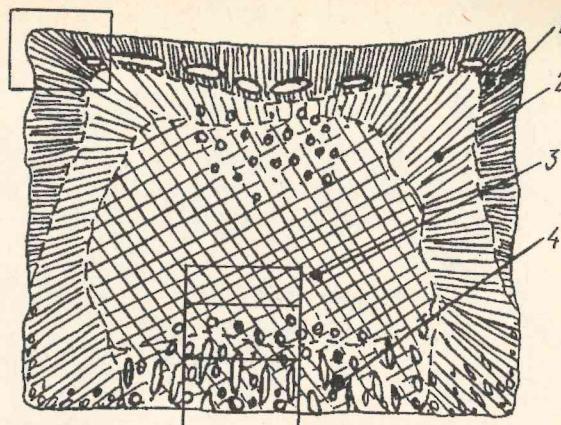
Перспективной формой матричных материалов является СИНРОК (от synthetic rock — искусственная порода). Базовая разновидность материала СИНРОК представляет собой микрокристаллическую смесь цирконолита, голландита и перовскита [8—10]. Существуют и другие его модификации, содержащие кроме упомянутых фаз такие минералы, как рутил, пирохлор, цельзиан, лейцит, нефелин и шпинель [7—11]. Набор кристаллических фаз зависит от валового состава керамики, который, в свою очередь, определяется соотношением радионуклидов в отходах, подлежащих консервации.

К настоящему времени разработан способ синтеза материала СИНРОК методом горячего прессования [7—11]. В ряде работ обсуждалась также возможность его получения кристаллизацией из расплава [2, 4, 6]. Эффективным приемом синтеза тугоплавких материалов является индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ). В работах [2—4] подробно описаны технология метода ИПХТ и его применение для отверждения радиоактивных отходов путем их включения в СИНРОК. Детального исследования состава СИНРОКа, синтезированного данным методом, до сих пор не проводилось.

Условия приготовления образцов

Составы исходной шихты готовились с учетом данных о композитах СИНРОК-Б и СИНРОК-С, описанных в литературе [7—10]. В ходе экспериментов часть расплавленного материала из тигля сливали на толстую металлическую плиту. Этим обеспечивались быстрый отвод тепла от расплава и его кристаллизация с

C-2



C-3

Рис. 1. Строение блока керамики СИНРОК-С и положение проб C-2 и C-3 (масштаб 1:1): микрокристаллические агрегаты: 1 — с шестоватым срастанием кристаллов (корка); 2 — с шестоватым срастанием кристаллов и микропористой текстурой; 3 — с микропористой текстурой и перегородчатой структурой срастания кристаллов; 4 — с большим количеством газовых пор и перегородчатой структурой срастания кристаллов

образованием микрокристаллического агрегата закалочной фазы. Оставшийся в тигле расплав охлаждали путем постепенного снижения температуры за счет уменьшения мощности высокочастотного генератора. В этом случае процесс остывания расплава занимал большее время, что приводило к формированию лучше раскристаллизованных образцов, в которых кристаллы минералов видны невооруженным глазом. Для изучения полученного материала из блока керамики отобрали несколько образцов. Закалочная фаза (слив на плиту) обозначена С-1. Образцы, полученные при кристаллизации расплава в тигле, для СИНРОК-Б обозначены Б-2 (донная часть тигля) и Б-3 (центральная часть), а для СИНРОК-С — С-2 (верхняя часть блока) и С-3 (центральная часть) соответственно. Их положение на примере СИНРОК-С показано на рис. 1.

Химический и минеральный составы образцов

Результаты определения состава образцов, полученные методами «мокрой» химии, в целом коррелируют с данными для исходной шихты (табл. 1). Вместе с тем наблюдается некоторое различие состава проб, отобранных в различных участках блока. Неоднородность в распределении характерна для титана, алюминия, циркония, кальция и бария, т. е. практически для всех основных компонентов керамики. Так, в составе образца Б-2 по сравнению с Б-3 выше содержание титана, но ниже количество бария и циркония. В целом проба Б-3 в наибольшей степени соответствует составу исходной шихты. Для образца СИНРОК-С близкими составами характеризуются пробы С-1 и С-2, которые отличаются от пробы С-3 несколько более высоким содержанием титана и меньшим количеством алюминия и циркония. Составу исходной шихты в наибольшей мере отвечают образцы С-1 и С-2. Отметим также, что в образцах присутствуют такие элементы, как кремний, калий и натрий, отсутствующие в исходной шихте. Их наличие в составе матриц, вероятно, обусловлено растворением в расплаве вещества, используемого в качестве огнеупорной обмазки тигля.

Минеральный состав керамики СИНРОК-Б охарактеризован на примере образцов Б-2 и Б-3, полученных в условиях медленного остывания расплава в

Таблица 1

Составы исходной шихты и керамики СИНРОК по данным химического анализа

Оксисел, мас. %	СИНРОК-Б			СИНРОК-С		
	шихта	Б-2	Б-3	шихта	С-1	С-2
SiO ₂	—	0,7	0,8	—	0,7	1,0
TiO ₂	59,1	68,3	59,1	52,2	51,5	52,2
Al ₂ O ₃	6,2	6,6	6,2	10,6	9,3	9,6
Fe ₂ O ₃	—	0,1	0,1	0,9	1,0	0,9
CoO	0,5	0,4	0,2	—	—	—
NiO	—	—	—	0,3	0,8	0,3
CaO	15,8	13,4	14,2	12,9	10,4	9,0
SrO	0,5	0,6	0,5	0,6	1,0	1,0
BaO	6,3	2,5	5,4	5,8	6,9	8,6
Na ₂ O	—	0,4	0,3	—	0,4	0,2
K ₂ O	—	0,1	0,2	—	0,2	0,2
Cs ₂ O	0,5	0,4	0,3	0,7	0,3	0,3
ZrO ₂	10,6	6,5	12,5	10,6	10,0	10,3
Ce ₂ O ₃	—	—	—	1,0	2,2	1,6
Nd ₂ O ₃	—	—	—	2,7	2,1	1,3
Gd ₂ O ₃	0,5	—	0,2	—	—	—
MoO ₃	—	—	—	1,7	3,2	3,5
						3,9

Примечание. Сумма окислов приведена к 100%. Прочерк — элемент отсутствует. Анализы выполнены С. А. Горбачевой и Н. В. Королевой (ИГЕМ РАН).

тигле. Б-2 имеет зеленовато-серый цвет, микропузристую структуру и содержит протяженные газовые каналы шириной 1—2,5 и длиной 5—7 мм. В строении образца участвуют микрокристаллическая основная масса и вкрапленники, представленные удлиненными кристаллами цирконолита и рутила. Кристаллы цирконолита, длиной от 0,2 до 0,7 мм, довольно равномерно рассеяны в основной массе. В проходящем свете минерал бесцветный или сероватый. В скрещенных николях имеет близкое к прямому угасание и отрицательное удлинение, $n_g - n_p = 0,025$. Рутил равномерно рассеян в основной массе, образуя тонкоигольчатые кристаллы размером от 0,01 до 0,05 мм. В скрещенных николях он характеризуется прямым угасанием и высокими цветами интерференции.

Основная масса образца Б-2 сложена микрокристаллическим агрегатом. По данным микрозондовых определений (табл. 2), электронной микроскопии и рентгенофазового анализа она состоит из сростков мельчайших зерен голланита, перовскита и рутила. Кроме того, в ней установлено присутствие мельчайших зерен еще одной минеральной фазы размером в первые тысячные доли миллиметра, основным компонентом которой является алюминий; присутствуют также титан, кобальт, кальций и стронций, что позволило диагностировать эту фазу как хибонит. Оценка доли отдельных фаз в образце (%) дифрактометрическим методом дала следующие результаты: цирконолит 25—30, голланит 10—15, перовскит 25—30 и рутил 25—30. Хибонит на дифрактограммах не обнаружен, вероятно, из-за малого количества данного минерала в образце.

Образец Б-3 характеризует центральную, наиболее раскристаллизованную часть блока керамики. Материал имеет буровато-коричневый цвет, микропузристую текстуру и мелкокристаллическую структуру. Он сложен вкрап-

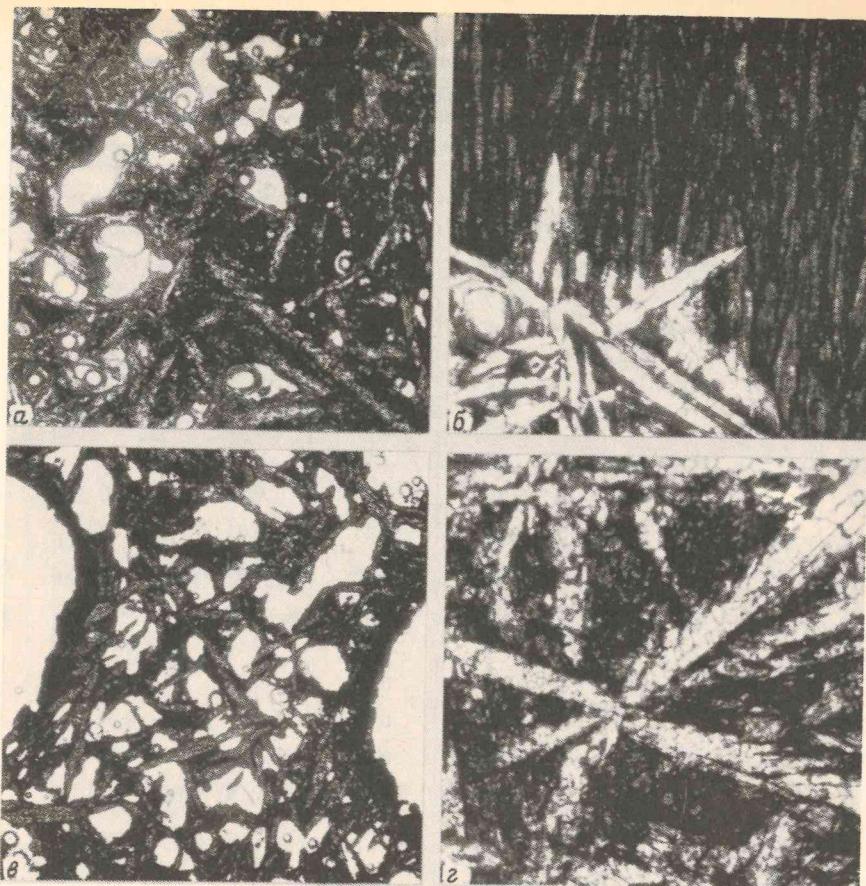


Рис. 2. Микрофотографии керамики СИНРОК-Б (а) и СИНРОК-С (б, в, г): а — образец Б-3: удлиненные кристаллы цирконолита в микрокристаллической основной массе (увел. 30, ник. II); б — образец С-1: звездчатые сростки кристаллов цирконолита в криптокристаллической основной массе с направленной структурой роста (увел. 150, ник. II); в — образец С-3: кристаллы цирконолита с перегородчатой структурой срастания, в интерстициях, и вокруг газовых каналов — голланит с перовскитом (увел. 25, ник. II); г — образец С-3: звездчатые сростки цирконолита, в интерстициях — голланит с перовскитом (увел. 150, ник. II). Белое — поры, серое — цирконолит, темное — основная масса

ленниками и основной массой. Вкрапленники представлены цирконолитом, который образует как единичные кристаллы, так и звездчатые сростки размером от 0,3 до 1,5 мм (рис. 2, а). Оптические свойства цирконолита такие же, как и у аналогичной фазы из образца Б-2.

Основная масса образца состоит из микрокристаллического агрегата голланита и перовскита. Голланит представлен столбчатыми и удлиненно-призматическими кристаллами размером 0,1—0,5 мм. В проходящем свете имеет мутный буровато-желтый цвет и слабый плеохроизм в желтоватых тонах, прямое угасание, положительное удлинение и высокие цвета интерференции. Перовскит образует кристаллы с сечениями квадратной формы размером 0,05—0,15 мм. В проходящем свете бесцветный, в скрещенных николях слабо анизотропен.

Оценка соотношений минералов в образце по данным дифрактометрического анализа дала следующие относительные количества фаз, %: цирконолит 40—45, голланит 30—36, перовскит 15—20, рутил 5—10. Состав отдельных минералов выдержан (табл. 3). Лишь для цирконолита наблюдается изменение состава от центра зерен к краям (рис. 3), выраженное в уменьшении содержания Zr и одновременном увеличении количества Ti.

Таблица 2

Составы (мас. %) и формулы минералов в образце Б-2

Оксид	Цирконолит	Голландит	Хибонит	Рутил
Al ₂ O ₃	2,02	2,04	12,41	13,00
ZrO ₂	27,31	26,10	0,58	0,47
TiO ₂	53,55	54,54	63,18	63,70
BaO	—	—	17,91	18,58
SrO	—	—	0,38	0,28
CaO	16,54	16,43	1,85	0,55
CoO	0,04	0,06	1,32	1,02
Na ₂ O	—	—	0,70	0,67
Cs ₂ O	—	—	1,66	1,72
Gd ₂ O ₃	0,54	0,82	—	—
Al ³⁺	0,13	0,13	1,82	1,90
Zr ⁴⁺	0,72	0,69	0,04	0,03
Ti ⁴⁺	2,19	2,22	5,90	5,94
Ba ²⁺	—	—	0,87	0,90
Sr ²⁺	—	—	0,03	0,02
Ca ²⁺	0,96	0,95	0,25	0,07
Co ²⁺	—	—	0,13	0,10
Na ¹⁺	—	—	0,17	0,16
Cs ¹⁺	—	—	0,09	0,09
Gd ³⁺	0,01	0,01	—	—

Примечание. Формулы даны для цирконолита на 7, для голландита на 16, для хибонита на 19 и для рутила на 2 атома кислорода. Определения выполнены И. П. Лапутиной (ИГЕМ РАН).

Минеральный состав керамики Б-3 отличается от такового для пробы Б-2 несколько большим количеством цирконолита и меньшим — рутила. Составы минералов из этих двух образцов близки между собой. Наибольшие различия характерны для голландита, который в образце Б-3 содержит меньше Na и Cs при более высокой концентрации Ba.

СИНРОК-С охарактеризован на примере трех образцов — закалочной фазы (С-1), а также материала, полученного в условиях медленной кристаллизации расплава в тигле (С-2 и С-3).

Закалочная фаза (С-1) представляет собой пластинку темно-серого цвета толщиной 6—7 мм. Она состоит из двух частей, разделенных по центру газовой полостью шириной 1—2 мм. Вещество закалочной фазы имеет плотное строение и состоит из микрокристаллов, ориентированных перпендикулярно поверхности пластинки.

Под микроскопом устанавливается, что образец состоит из основной массы, на фоне которой выделяются звездчатые сростки кристаллических фаз размером 0,1—0,5 мм (рис. 2, б). Основная масса составляет 85—90% площади шлифа и представлена криптокристаллическим агрегатом со структурой роста в виде «пальмовых листьев» или «морозных узоров». Очень мелкий размер зерен не позволил изучить отдельные минералы оптическими методами. В проходящем свете вещество основной массы обладает зеленовато-желтой окраской и резким плеохроизмом в зеленовато-серых — желто-коричневых тонах. В скрещенных николях ему свойственны высокие цвета интерференции и волнистое муаровое угасание.

Таблица 3

Составы (мас. %) и формулы минералов в образце Б-3

Оксид	Цирконолит				Голландит		Перовскит	Рутил
Al ₂ O ₃	2,02	2,13	2,06	1,83	13,62	13,07	—	—
ZrO ₂	34,84	34,30	24,96	27,32	0,42	0,64	0,60	0,43
TiO ₂	47,29	47,14	56,03	54,26	63,01	62,62	58,54	58,14
BaO	—	—	—	—	20,21	20,04	—	—
SrO	—	—	—	—	0,28	0,39	1,61	1,22
CaO	15,25	15,57	16,12	15,82	0,70	1,53	38,41	39,11
CoO	0,05	0,06	0,06	0,05	1,01	0,87	—	—
Na ₂ O	—	—	—	—	0,19	0,24	0,30	0,20
Cs ₂ O	—	—	—	—	0,57	0,53	—	—
Gd ₂ O ₃	0,55	0,79	0,77	0,72	—	0,08	0,55	0,89
Al ³⁺	0,13	0,14	0,13	0,12	1,99	1,92	—	—
Zr ⁴⁺	0,95	0,93	0,66	0,72	0,03	0,04	0,01	0,00
Ti ⁴⁺	1,99	1,98	2,27	2,22	5,87	5,85	1,01	1,00
Ba ²⁺	—	—	—	—	0,98	0,98	—	—
Sr ²⁺	—	—	—	—	0,02	0,03	0,02	0,02
Ca ²⁺	0,91	0,93	0,93	0,92	0,09	0,20	0,94	0,96
Co ²⁺	—	—	—	—	0,10	0,09	—	—
Na ¹⁺	—	—	—	—	0,05	0,06	0,01	0,01
Cs ¹⁺	—	—	—	—	0,03	0,03	—	—
Gd ³⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	—	—	—	0,01

Примечание. Первые два анализа цирконолита отвечают центру зерен, следующие два — их краевым частям. Расчет формулы для первовскита проведен на 3 атома кислорода. Остальные — как в табл. 2.

Методами локального анализа установлено, что основная масса закалочной фазы состоит из субмикроскопических (размером 0,001—0,003 мм и менее) зерен голландита (преобладает), цирконолита, первовскита и молибдата щелочных земель, названного нами повеллитом по аналогии с известным в природе минералом. Иногда наблюдаются кристаллы тех же минералов чуть большего размера, вплоть до 0,01 мм. Выделения повеллита имеют размер меньше 0,001 мм и расположены между микрокристаллами цирконолита и голландита. Результаты определения состава фаз микрозондовым методом даны в табл. 4. Отметим высокие количества бария и алюминия в анализах цирконолита, что не свойственно данному минералу. Это обусловлено тем, что из-за мелкого размера зерен цирконолита при изучении на микрозонде электронным пучком частично захватывались расположенные рядом зерна голландита, находящиеся в тесном срастании с цирконолитом.

Звездчатые сростки кристаллических фаз занимают остальные 10—15% площади образца С-1. Они состоят из четырех — шести кристаллов цирконолита, между которыми располагаются зерна голландита, первовскита и повеллита. Цирконолит образует тонкие таблитчатые кристаллы, которые в

Таблица 4

Составы (мас. %) и формулы минералов основной массы в образце С-1
(размер отдельных зерен 0,001—0,003 мм)

Оксид	Цирконолит	Голландит	Перовскит	
Al ₂ O ₃	5,13	5,81	12,68	13,28
ZrO ₂	18,81	15,18	0,69	0,58
TiO ₂	52,78	53,58	60,87	60,82
SiO ₂	0,06	0,16	—	—
MoO ₃	0,68	1,22	—	—
BaO	7,90	10,54	21,46	21,51
SrO	0,27	0,33	0,58	0,52
CaO	9,31	7,86	0,40	0,42
Cs ₂ O	—	—	0,14	—
FeO	0,97	1,16	1,24	1,11
NiO	0,97	1,19	1,94	1,76
Ce ₂ O ₃	1,88	1,87	—	—
Nd ₂ O ₃	1,24	1,11	—	—
Al ³⁺	0,34	0,39	1,89	1,97
Zr ⁴⁺	0,52	0,42	0,04	0,04
Ti ⁴⁺	2,24	2,28	5,79	5,76
Si ⁴⁺	—	0,01	—	—
Mo ⁶⁺	0,02	0,03	—	—
Ba ²⁺	0,17	0,23	1,06	1,06
Sr ²⁺	0,01	0,01	0,04	0,04
Ca ²⁺	0,56	0,48	0,05	0,06
Cs ¹⁺	—	—	0,01	—
Fe ²⁺	0,05	0,05	0,13	0,12
Ni ²⁺	0,04	0,05	0,20	0,18
Ce ³⁺	0,04	0,04	—	—
Nd ³⁺	0,02	0,02	—	—

Условные обозначения см. табл. 2 и 3.

сечении шлифа имеют удлиненно-призматическую, копьевидную форму. Их размер колеблется от 0,05 до 0,2 мм. В проходящем свете минерал имеет розоватую окраску и обладает отчетливым плеохроизмом. По оси N_g наблюдается бледно-розовая окраска, по N_p — более густая, схема адсорбции $N_p > N_g$. Угасание близко к прямому, удлинение отрицательное, характерны простые двойники. Интерференционная окраска желто-красная второго порядка, что соответствует $n_g - n_p = 0,027$. Минерал двухосный, отрицательный, угол $2V$ около 80° .

Голландит располагается в промежутках между зернами цирконолита и образует кристаллы удлиненно-призматической формы, которые в поперечных разрезах обладают прямоугольными и квадратными сечениями. Размер этих выделений от 0,05 до 0,1 мм. В проходящем свете минерал интенсивно окрашен и обладает резким плеохроизмом. По N_g окраска темно-зеленого цвета, по N_p — светлая зеленовато-желтая. Схема адсорбции $N_g > N_p$. Минерал обладает хорошей

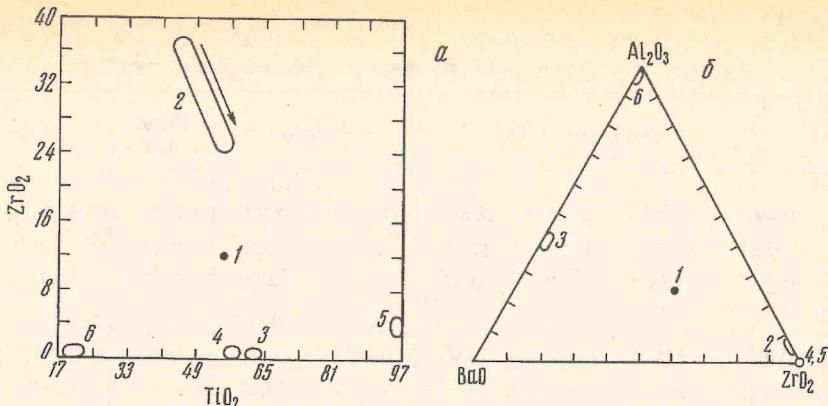


Рис. 3. Составы минералов (мас. %) в образце Б-3 (диаграмма а и б): 1 — весь образец в целом, 2 — цирконолит, 3 — голландит, 4 — перовскит, 5 — рутил, 6 — хибонит. Стрелкой показано изменение состава цирконолита от центра зерен к их краевым частям

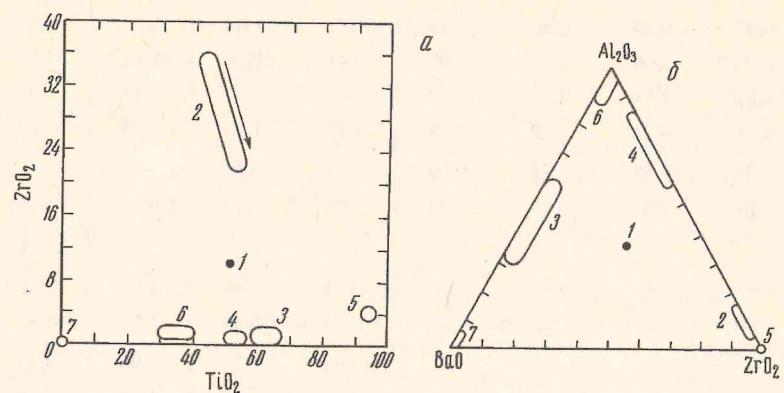


Рис. 4. Составы минералов (мас. %) в образце С-1. Поле повеллита показано цифрой 7. Остальные обозначения см. рис. 3

спайностью. Угасание прямое, удлинение положительное. Интерференционная окраска высокая, $n_g - n_p = 0,04$. Минерал одноосный положительный.

Перовскит образует мелкие, размером в сотые доли миллиметра, изометрические зерна, включенные в кристаллы голландита или расположенные между кристаллами цирконолита и голландита. Цвет минерала темный, коричневато-бурый. В скрещенных николях перовскит слабо анизотропен.

Повеллит при изучении образцов в оптическом микроскопе не обнаружен. Согласно результатам исследования проб методами электронной микроскопии и микрозондового анализа, он размещается между кристаллами цирконолита и голландита в виде мельчайших выделений размером в первые тысячные доли миллиметра.

Химические составы цирконолита, голландита, перовскита и повеллита из звездчатых сростков, а также их кристаллохимические формулы приведены в табл. 5. В голландите вкрапленников по сравнению с тем же минералом основной массы выше содержания Ti, Sr и Ca, но ниже количества Al и Ba; в перовските выше содержания Ca и Sr, но меньше Al. Вариации содержаний компонентов в минеральных фазах показаны на рис. 4. В целом для керамики С-1 характерны большие вариации состава минералов по сравнению с аналогичными фазами образца СИНРОК-Б.

Устанавливается определенная последовательность формирования минералов

Таблица 5

Составы (мас. %) и формулы фаз из сростков в образце С-1

Оксид	Цирконолит				Голландит		Перовскит	Повеллит	
Al ₂ O ₃	2,49	3,60	2,82	2,69	11,93	8,73	0,96	4,15	3,92
ZrO ₂	28,73	33,43	27,28	27,11	1,88	0,89	0,40	—	—
TiO ₂	49,31	44,68	49,18	50,37	60,95	64,89	52,83	1,49	1,98
SiO ₂	—	—	—	—	0,11	0,02	—	0,36	0,38
MoO ₃	0,06	0,10	—	0,07	0,54	1,17	0,38	49,69	48,96
BaO	—	—	—	—	17,11	17,16	—	20,48	19,96
SrO	—	—	—	—	1,06	1,07	3,92	7,81	7,91
CaO	14,08	13,02	14,35	13,33	2,93	1,02	30,77	14,24	14,41
Cs ₂ O	0,04	0,05	0,03	0,03	0,06	0,13	0,01	0,33	0,48
FeO	0,71	0,67	0,91	0,78	1,30	2,86	0,15	0,92	0,85
NiO	0,47	0,29	0,50	0,39	1,71	1,84	0,06	0,45	0,52
Ce ₂ O ₃	2,30	2,16	2,66	2,97	0,41	0,20	7,14	0,07	0,63
Nd ₂ O ₃	1,82	2,00	2,27	2,27	—	—	3,38	—	—
Al ³⁺	0,16	0,24	0,19	0,18	1,75	1,29	0,03	0,19	0,18
Zr ⁴⁺	0,78	0,93	0,75	0,74	0,11	0,05	—	—	—
Ti ⁴⁺	2,08	1,91	2,07	2,12	5,70	6,11	0,97	0,04	0,06
Si ⁴⁺	—	—	—	—	0,01	—	—	0,01	0,02
Mo ⁶⁺	—	—	—	—	0,03	0,06	—	0,82	0,81
Ba ²⁺	—	—	—	—	0,83	0,84	—	0,32	0,31
Sr ²⁺	—	—	—	—	0,08	0,08	0,06	0,18	0,18
Ca ²⁺	0,84	0,79	0,86	0,80	0,39	0,14	0,80	0,60	0,61
Cs ¹⁺	—	—	—	—	—	0,01	—	0,01	0,01
Fe ²⁺	0,03	0,03	0,04	0,04	0,14	0,30	—	0,03	0,03
Ni ²⁺	0,02	0,01	0,02	0,02	0,17	0,18	—	0,01	0,02
Ce ³⁺	0,05	0,04	0,05	0,06	0,02	0,01	0,06	—	0,01
Nd ³⁺	0,04	0,04	0,05	0,05	—	—	0,03	—	—

Примечание. Для цирконолита первые два анализа отвечают центру зерен, следующие два — их краевым частям. Обозначения как в табл. 2 и 3

в образце С-1. Сначала из расплава кристаллизуется цирконолит, образующий относительно крупные идиоморфные кристаллы, вслед за ним формируются перовскит и голландит. Эти минералы образуют звездчатые сростки. Затем, по мере остывания расплава, происходит быстрая кристаллизация оставшейся его части с образованием криптокристаллического агрегата тех же минералов с направленным ростом кристаллов от краев к центру образца. Количество отдельных минералов в образце С-1 по данным фазового дифрактометрического анализа составляют 45—50% для цирконолита, 35—40% для голландита и 10—15% для перовскита, повеллит на дифрактограммах не обнаружен из-за малого его количества.

Блок керамики СИНРОК-С (С-2, С-3), полученный в результате остывания расплава в тигле, имеет довольно сложное зональное строение (рис. 1). Образец

С-2 отобран в верхней его части, в зоне контакта со стенкой тигля, а С-3 характеризует строение центральной части блока.

Образец С-2 имеет серый цвет, массивную текстуру с шестоватым и радиально-лучистым расположением микрокристаллов. Он состоит из криптокристаллического агрегата зерен со структурой роста кристаллов в виде «пальмовых листьев» в направлении от стенок тигля и поверхности к центру образца. По оптическим свойствам минералы полностью аналогичны таковым в образце С-1. В более крупных зернах цирконолита, образованных в раннюю стадию кристаллизации расплава, выше содержание Zr и ниже концентрации Al и Ti по сравнению с составом этого минерала в микрокристаллическом агрегате; вкрапленники голландита содержат больше Ti и Ba, но меньше Al, Sr и Ca по сравнению с аналогичной фазой из основной массы; в перовските выше содержание Ti и ниже количество Sr. Последовательность кристаллизации минералов совпадает с той, что наблюдается в закалочной фазе (образец С-1). Сначала формировались вкрапленники цирконолита, затем перовскита и голландита, после чего происходила совместная кристаллизация цирконолита, перовскита и голландита с образованием микрокристаллического агрегата всех этих фаз.

Образец С-3 характеризует строение и состав керамики в нижней и центральной частях блока (рис. 1). В нижней части блока материал имеет пузыристую текстуру, насыщен газовыми пузырями и пронизан вертикальными газовыми каналами. Высокая пористость вещества в этих участках также обусловлена характерным срастанием кристаллов цирконолита, образующих своеобразную перегородчатую структуру. Во внутренней части тигля образец становится менее пористым, исчезают газовые каналы, уменьшаются размеры и количество пор. Пористость в этой зоне в основном обусловлена перегородчатой структурой срастания зерен цирконолита.

В шлифах материал из этих участков имеет мелкокристаллическую структуру с характерными звездчатыми скоплениями кристаллов цирконолита (рис. 2, б). Кроме цирконолита присутствуют голландит, перовскит и рутил. Цирконолит образует крупные (0,5—1,0 мм) удлиненные кристаллы с острыми окончаниями. В интерстициях цирконолита развиты короткостолбчатые и удлиненно-призматические выделения голландита размером от 0,3 до 0,7 мм. Характерно расположение зерен голландита в виде каймы обрамления вокруг газовых каналов. Перовскит образует мельчайшие кристаллы изометричной формы, включенные в зерна голландита. Более редкие тонкоигольчатые кристаллы рутила располагаются вблизи газовых пор и каналов. Цвет рутила в проходящем свете бурый, в скрещенных николях он имеет прямое угасание и высокие интерференционные окраски.

Центральная часть образца С-3 имеет массивный, плотный облик. Она представлена компактным срастанием зерен тех же минералов, в промежутках которых отмечаются редкие газовые поры округлой формы размером 0,05—0,10 мм (рис. 2, г). Основное отличие образца из центральной части блока касается характера срастания минералов. Цирконолит здесь образует четырех- и шестилучевые звездчатые сростки размером 0,1—0,5 мм, промежутки между которыми заполнены мелкокристаллическим агрегатом цирконолита, голландита, перовскита и повеллита.

Оценка относительных количеств фаз (%) в образцах С-2 и С-3 с использованием дифрактометрического анализа дала следующие результаты: цирконолит 45—50, голландит 35—40, перовскит 10—15, рутил около 5. Отметим, что рутил обнаружен лишь в наиболее раскристаллизованной части образца С-3. Возможно, это связано с поздним временем его формирования относительно других минералов. По-видимому, для формирования рутила требуется длительный период остывания расплава, способный обеспечить рост этого минерала до размеров, необходимых для его диагностики.

Обсуждение полученных данных

Анализ полученных данных позволяет сформулировать ряд выводов, касающихся особенностей состава образцов, их сходства и отличия от подобных материалов, синтезированных горячим прессованием, а также от природных минералов-аналогов.

СИНРОК-Б состоит из цирконолита, голландита, перовскита, рутила и небольшого количества хибонита. Он обладает сравнительно простым валовым составом, что нашло отражение в составе слагающих его минералов.

В цирконолите основными компонентами (здесь и далее элементы расположены в порядке убывания их концентраций в минерале) являются Ti, Zr, Ca, Al, Gd, Co. Особенностью данного минерала является снижение концентрации Zr и увеличение содержания Ti в краевых частях зерен относительно центральных. В целом можно говорить о существенной роли изоморфного замещения Ti^{4+} на Zr^{4+} в структуре цирконолита. Различие составов краевых и центральных частей зерен минерала, вероятно, связано с изменением состава расплава в процессе кристаллизации цирконолита, а также уменьшением температуры.

В составе голландита керамики СИНРОК-Б фиксируются следующие компоненты: Ti, Ba, Al, Co, Cs, Na, Sr, Ca, Zr. Наличие двух последних элементов, возможно, обусловлено влиянием зерен цирконолита, находящихся в сростках с голландитом. Состав голландита в образце Б-2 отличается от такового в Б-3 меньшим содержанием Ba (в 1,1 раза) и более высокой концентрацией Na и Cs (в 3 раза). Последнее, вероятно, обусловлено изоморфизмом между Ba^{2+} и $(Cs, Na)^+$ в структурной решетке голландита.

Основными компонентами перовскита являются Ti и Ca, в качестве второстепенных элементов присутствуют Sr, Zr, Gd и Na. Эти особенности его состава хорошо согласуются со следующими схемами замещений в структуре минерала: $Ca^{2+} \rightleftharpoons Sr^{2+}$; $Ti^{4+} \rightleftharpoons Zr^{4+}$; $2Ca^{2+} \rightleftharpoons Na^+ + Gd^{3+}$.

Главным компонентом в составе рутила является Ti, в небольшом количестве присутствует Zr. Это, как и в случае с цирконолитом, объясняется изоморфным обменом между Ti^{4+} и Zr^{4+} . Отметим хорошее совпадение составов рутила в образцах Б-2 и Б-3, при том что количество этого минерала в образце Б-2 в несколько раз выше, чем в Б-3. Это позволяет заключить, что содержание ZrO_2 в рутиле на уровне 4 мас. % является предельным для выбранных параметров синтеза и отвечает изоморфной емкости данного минерала в отношении циркония.

Хибонит состоит преимущественно из Al, в меньших количествах присутствуют Ti, Co, Ba, Sr, Zr и Na. Эта фаза обнаружена лишь в образце Б-2, что, вероятно, связано с меньшим количеством в нем голландита, который является основным минералом — концентратором алюминия в образцах. Уменьшение количества голландита вызывает появление избыточного количества Al_2O_3 и формирование минерала, обогащенного глиноземом.

Во всех пробах керамики СИНРОК-С присутствуют цирконолит, голландит, перовскит и повеллит, в некоторых из них обнаружены также хибонит и рутил. Более сложный исходный состав керамики СИНРОК-С проявился и в составе слагающих ее минералов. Цирконолит во всех разновидностях керамики СИНРОК-С состоит из Ti, Zr, Ca, Al, Ce, Nd, Fe, Ni, Cs. От центра к краю зерен отмечается значительное снижение содержания циркония при возрастании количества титана, а в ряде случаев (образцы С-1, С-3) — и редких земель. В целом цирконолит из СИНРОК-С отличается от такового из СИНРОК-Б пониженным содержанием циркония и кальция, что компенсируется повышенным количеством в нем редких земель. Для объяснения этой особенности можно предложить следующую схему изоморфного обмена: $Ca^{2+} + Zr^{4+} = 2(Ce, Nd)^{3+}$. В образцах С-1 и С-2 содержание Ce выше, чем концентрация Nd, тогда как в С-3 отношение обратное: $Nd > Ce$.

Основными компонентами голландита во всех образцах керамики СИНРОК-С

являются Ti, Ba, Al, в меньших количествах присутствуют Fe, Ni, Ca, Sr, Zr, Ce, Cs, иногда в незначительном количестве фиксируются Mo и Si. Наибольшие вариации содержаний в составе минерала отмечаются для Ba, Ca, Al, Ti и Zr. Можно предложить две причины для объяснения этого обстоятельства. Во-первых, оно связано с тем, что в ряде случаев анализировались не чистые зерна голландита, а их мельчайшие сростки с другими кристаллическими фазами. Это наиболее вероятно для пробы С-2, сложенной агрегатом микрокристаллических фаз. Поскольку размер зерен минералов сравним с диаметром электронного зонда, поиск кристаллов для определения их состава представляет трудную задачу. Можно полагать, что анализы голландита с высокими содержаниями Zr и одновременно Ca обусловлены влиянием соседних зерен цирконолита, Ce, Nd и Ca — перовскита, Mo — повеллита. По-видимому, с тем же связаны высокие содержания Ba и Al в цирконолите из микрокристаллического агрегата пробы С-1.

Другое объяснение вариаций состава голландита связано с проявлением изоморфизма между компонентами в структуре минерала. Достаточно надежно устанавливаются следующие ряды элементов, способных замещать друг друга в решетке голландита: $Ba^{2+} - Ca^{2+} - Sr^{2+} - Cs^+ - Na^+$ в структурной позиции A кристаллохимической формулы минерала AM_6O_{16} , а также $Ti^{4+} - Si^{4+} - Al^{3+} - Fe^{3+} - Ni^{2+} - Co^{2+}$ в позиции M. Отметим повышенные содержания кремния и цезия в зернах голландита из микрокристаллического агрегата минеральных фаз в образце С-2.

В составе перовскита керамики СИНРОК-С основное значение имеют Ti, Ca, Ce, Nd, Sr, Al, иногда отмечаются Zr, Mo и Ba. Присутствие трех последних элементов может быть объяснено влиянием вростков цирконолита, повеллита и голландита соответственно. Отличие состава перовскита в образцах СИНРОК-С по сравнению с СИНРОК-Б состоит в более высоком количестве алюминия, повышенных содержаниях стронция и редких земель, пониженных количествах титана и кальция. Для объяснения указанных вариаций могут быть предложены следующие схемы замещений в структуре минерала: $Ca^{2+} \rightleftharpoons Sr^{2+}$ и $Ca^{2+} + Ti^{4+} \rightleftharpoons Al^{3+} + (Ce, Nd)^{3+}$. Наиболее высокие содержания алюминия свойственны перовскиту из микрокристаллического агрегата закалочной фазы С-1. Причина этого, вероятно, заключается в высокой скорости остывания, препятствующей дифференциации элементов в расплаве. В результате состав образующихся минералов задается не только возможностью вхождения элементов в их кристаллическую структуру, но также и захватом микропримесей вследствие быстрой кристаллизации расплава. В условиях более медленного остывания, характерных для внутренней части тигля, становится возможным диффузионное разделение компонентов в расплаве по мере его кристаллизации. В связи с этим минералы содержат меньше примесных компонентов и приближаются к своим теоретическим составам.

Основными компонентами рутила в СИНРОК-С, так же как в СИНРОК-Б, являются Ti и Zr, что связано с замещением части Ti^{4+} на Zr^{4+} .

В одном из образцов керамики СИНРОК-С, а именно в пробе С-3, обнаружены очень мелкие зерна высокоглиноземистого минерала, предположительно хибонита. Основным компонентом в его составе является Al, затем Ti, Ni, Ca, Ba, Sr, Fe, в незначительном количестве присутствуют Cs, Zr и редкие земли. Три последних элемента, часть титана, бария, кальция и стронция, вероятно, не входят в структуру минерала, а связаны с влиянием соседних зерен цирконолита, голландита и перовскита. Основные отличия состава этого минерала в СИНРОК-С от аналогичной фазы керамики СИНРОК-Б заключаются в меньшем количестве Ti и Ca, несколько большем количестве Al, Sr и Cs, появлении Ni вместо Co, а также присутствии заметного количества Fe.

Одним из наиболее существенных различий минеральных ассоциаций СИНРОКов Б и С является присутствие в последнем молибдата щелочных земель, названного нами повеллитом по аналогии с известным природным минералом.

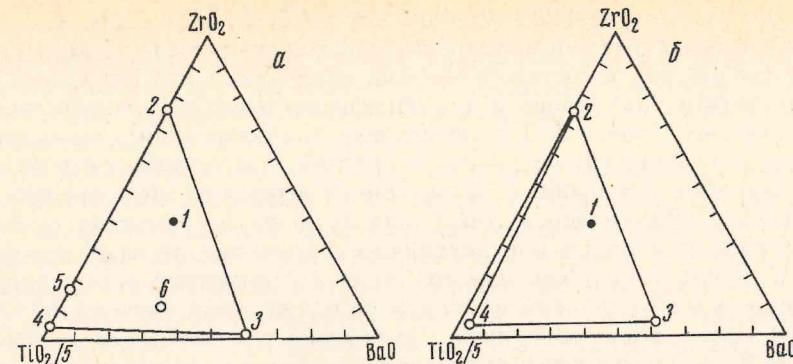


Рис. 5. Расчет количества минералов в образцах Б-3 (а) и С-1 (б). Содержание TiO_2 уменьшено в 5 раз для удобства изображения. Обозначения см. рис. 3 и 4

Общей закономерностью его состава в образцах С-1 и С-3 является преобладание Ba над Ca и Sr, особенно заметно проявленное в образце С-3. Основное различие состоит в более низкой концентрации кальция и стронция в повеллите из пробы С-3 относительно С-1. В составе данной фазы из пробы С-1 отмечается некоторое количество Al, Ti, Fe и Ni, что, вероятно, связано с присутствием зерен другого минерала, скорее всего хибонита.

Результаты микрозондовых определений позволили рассчитать средние составы различных минеральных фаз в изученных типах композита СИНРОК. На основании этих данных и с учетом валового состава образцов, полученных методами «мокрой» химии, была сделана попытка оценить количества минералов в образцах. Подобный расчет был выполнен на примере проб Б-3 и С-1. Он основан на том факте, что каждый минерал вносит вклад в валовое содержание компонента в соответствии с его долей в образце и концентрацией данного компонента в минерале. Исходя из этого можно составить систему уравнений, решение которой позволяет найти относительные количества каждой из фаз. Для смесей с небольшим количеством фаз возможно более простое графическое решение этой задачи путем построения тройных диаграмм (рис. 5). С этой целью через точку валового состава проводятся линии, параллельные сторонам треугольника, образованного средними составами главных минеральных фаз. Эти линии разбивают стороны треугольника на отрезки, пропорциональные содержаниям минералов в образце. Таким образом было определено, что образец Б-3 состоит из 45% цирконолита, 30% голландита, 15% первовскита, 10% рутила. Для пробы С-1 расчет минерального состава дал следующие величины: 44% цирконолита, 38% голландита, 12% первовскита и 6% повеллита. Полученные значения в целом согласуются с относительными количествами минералов, оцененных на основании изучения порошковых дифрактограмм образцов.

Эти данные позволили охарактеризовать распределение компонентов между различными минералами и оценить их относительные количества, приходящиеся на различные кристаллические фазы (табл. 6). В идеальном случае суммарное количество каждого компонента во всех минералах должно составлять 100%. В действительности из-за погрешностей в определении состава минералов и пробы в целом, а также относительных количеств минералов в керамике возможно отклонение этой величины от 100% как в меньшую, так и в большую сторону. Для большинства компонентов их расчетное суммарное содержание составило от 80 до 120% по отношению к реальному валовому составу образцов, определенному химическим анализом. Дефицит Al в расчетных составах проб может быть устранен добавлением небольшого количества хибонита, присутствие которого в образцах доказано локальными методами анализа. По нашим оценкам доля этой фазы равна 1–2% в образце Б-3 и 4–5% в пробе С-1. Суммарное расчетное

Таблица 6

Распределение компонентов между кристаллическими фазами в образцах Б-3 (А) и С-1 (Б) керамики СИНРОК

Оксид	Составы минералов, мас. %				Элемент	Цирк	Голл	Пер	Пов	Вал	Доля элемента в минерале, отн. %				Сумма	
	Цирк	Голл	Пер	Пов							Al	Zr	Ti	Ba	Sr	
Al ₂ O ₃	2,1	13,4	0,0	0,0	6,3	15	64	0	0	0	79					
ZrO ₂	31,0	0,5	0,6	3,8	12,6	110	1	1	3	3	11,5					
TiO ₂	50,2	63,4	58,0	95,4	59,7	38	32	14	16	16	100					
BaO	0,0	19,4	0,0	0,0	5,5	0	106	0	0	0	106					
SrO	0,0	0,3	1,6	0,0	0,5	0	18	47	0	0	65					
CaO	15,8	1,2	38,8	0,8	14,4	49	3	40	1	1	93					
CoO	0,1	1,0	0,0	0,0	0,3	15	100	0	0	0	115					
Cs ₂ O	0,0	0,8	0,0	0,0	0,3	15	79	0	0	0	94					
Cd ₂ O ₃	0,8	0,0	0,6	0,0	0,4	89	0	22	0	0	111					
Б																
Al ₂ O ₃	2,9	11,8	2,7	4,0	9,4	14	48	3	3	3	68					
ZrO ₂	27,9	1,1	0,5	0,0	10,1	121	4	1	0	0	126					
TiO ₂	49,8	61,9	52,8	1,7	52,2	42	45	12	0	0	99					
MoO ₃	0,1	0,3	0,4	49,7	3,2	1	4	1	92	1	98					
BaO	0,0	19,6	0,3	20,2	7,0	0	106	1	1	17	124					
SrO	0,0	0,7	3,6	7,9	1,0	0	26	43	47	47	116					
CaO	13,7	1,0	28,6	14,3	10,5	57	4	32	8	8	101					
Cs ₂ O	0,1	0,1	0,0	0,4	0,3	8	19	0	8	8	35					
FeO	0,7	1,5	0,2	0,9	1,0	31	56	2	5	5	94					
NiO	0,4	1,9	0,2	0,5	0,8	22	88	3	4	4	117					
Ce ₂ O ₃	2,4	0,1	7,2	0,4	2,2	47	2	39	1	1	89					
Nd ₂ O ₃	2,0	0,0	3,5	0,0	2,1	41	0	20	0	0	61					

Примечание. Состав образца Б-3: цирконолит — 45%, голландит — 30%, первовскит — 15%, рутил — 10%. Состав образца С-1: цирконолит — 44%, голландит — 38%, первовскит — 12%, повеллит — 6%. Вал — валовый состав пробы. Сумма — суммарное количество элемента в пробе по всем минералам (содержание в пробе по данным химического анализа составляет 100%).

Таблица 7

Составы минералов керамики СИНРОК по данным [8—11]

Оксисел мас. %	Минералы из различных типов зарубежного СИНРОК				Теоретический состав				Гол	Цир	Пер	Рут				
	голландит		цирконолит		перовскит		рутил									
	E	F	C	E	C	E	E	F								
SiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
TiO ₂	78,6	69,0	48,5	43,3	58,1	43,6	97,8	97,1	65,6	47,2	58,9	100,0				
UO ₂	—	—	—	3,8	—	0,5	—	1,4	—	—	—	—				
Al ₂ O ₃	—	11,2	3,3	—	0,3	—	—	1,3	14,0	—	—	—				
CaO	—	0,2	16,1	13,8	41,1	35,6	0,1	0,2	—	16,5	41,1	—				
BaO	4,4	18,2	—	—	—	—	—	—	20,4	—	—	—				
SrO	—	—	—	0,4	—	4,7	—	—	—	—	—	—				
Cs ₂ O	17,0	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
ZrO ₂	—	—	32,1	35,7	0,5	0,3	2,1	—	—	36,3	—	—				
REE ₂ O ₃	—	—	—	3,0	—	15,3	—	—	—	—	—	—				
MoO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				

Примечание. Прочерк означает отсутствие элемента. Теоретический состав фаз рассчитан исходя из следующих формул: голландит — BaAl₂Ti₆O₁₆, цирконолит — CaZrTi₂O₇, рутил — TiO₂, перовскит — CaTiO₃. Буквами С, Е и F обозначены разновидности керамики СИНРОК.

количество Cs в образце С-1 составляет ~35% содержания элемента в пробе. Это, вероятно, связано с присутствием какой-то неустановленной фазы, аккумулирующей оставшиеся 65% количества Cs. Для окончательного решения этого вопроса требуются дополнительные исследования.

В целом из полученных данных следует, что в образце Б-3 цирконолит является основным минералом-концентратором Zr и Nd; голландит — Al, Ba, Cs и Co; перовскит — Sr. Титан в близких пропорциях распределяется между этими тремя фазами и рутилом. В образце С-1 цирконий сосредоточен в цирконолите; Ti, Fe и Ni преимущественно концентрируются в цирконолите и голландите; Ca и редкие земли — в цирконолите и перовските; Sr — в голландите, перовските и повеллите; Cs — в голландите и повеллите; Mo — в повеллите и т. д.

Представляет интерес сравнение материалов, синтезированных в МосНПО «Радон», с их зарубежными прототипами. В табл. 7 даны анализы кристаллических фаз керамик СИНРОК, полученных зарубежными исследователями, а также теоретические составы минералов, рассчитанные из их формул. Сравнительный анализ составов минералов российского и зарубежного материала, выполненный на примере образца С-1 и австралийской керамики СИНРОК-С, выявил некоторые особенности минералов, синтезированных в МосНПО «Радон». Так, голландит характеризуется меньшим содержанием Ti и Cs при более высокой концентрации Ba и Al. Перовскит содержит меньше Ca и Ti, но больше Al и редких земель. Особенностью минерального состава образцов из МосНПО «Радон» является также присутствие фаз хибонита и повеллита.

Эти различия связаны с неодинаковым валовым составом образцов, а также параметрами их синтеза, в частности окислительно-восстановительными условиями. В голландите австралийских керамик, приготовленных в восстановительных условиях, Ti присутствует и в трех, и в четырехвалентном состоянии с соотношением Ti³⁺/Ti⁴⁺ от 0,10 до 0,26 [5]. В голландите СИНРОКа МосНПО «Радон» трехвалентный титан, вероятно, отсутствует, поскольку все

октаэдрические позиции в формуле минерала заняты Al, Fe, а также Co или Ni. Это, наряду с присутствием повеллита, в котором Mo имеет максимальную валентность +6, указывает на окислительные условия синтеза методом ИПХТ. На возможность образования молибдатов при получении керамики СИНРОК в окислительных условиях указывалось также в работах [9, 10].

Вариации составов цирконолита, голландита и рутила керамики МосНПО «Радон» по большинству компонентов укладываются в диапазоны колебаний состава соответствующих природных минералов [1]. Расхождение наблюдается лишь по тем элементам, которые в существенных количествах представлены в образцах, но отсутствуют в заметных концентрациях в природе или, наоборот, отсутствуют в составе синтетических образцов при существенной их роли в природе. Так, природный цирконолит обычно содержит высокие концентрации тория, урана и ниобия, которые не вводились в состав шихты и соответственно отсутствуют в искусственном цирконолите. Природный голландит (прайдерит) помимо бария содержит значительное количество калия и железа и т. д.

Наиболее значительные отличия составов по сравнению с аналогичными природными минералами наблюдаются для синтетического повеллита. Они выражены в высоких содержаниях стронция и особенно бария, значительно превышающих количество кальция, тогда как в природе этот минерал имеет кальциевый состав.

Все минералы композита СИНРОК, за исключением повеллита, обладают высокой стабильностью в природных процессах. Это позволяет надеяться на длительную сохранность в недрах Земли керамик, полученных методом ИПХТ. Для окончательной оценки их пригодности в качестве матриц радиоактивных отходов необходимы дополнительные лабораторные исследования устойчивости СИНРОК в присутствии нагретых подземных вод, так, как это сделано для других типов матричных материалов.

Выходы

Результаты изучения состава керамики СИНРОК, полученной методом ИПХТ, позволяют сделать следующие выводы.

1. Керамика СИНРОК-Б сложена цирконолитом (30—40%), голландитом (20—30%), перовскитом (15—25%), рутилом (10—20%) и хибонитом (1—2%).

СИНРОК-С состоит из цирконолита (40—50%), голландита (30—40%), перовскита (10—20%), повеллита (4—6%), рутила и хибонита (по 3—5%).

2. Составы и структурные параметры кристаллических фаз близки к таковым для соответствующих природных минералов, а также минералов керамики СИНРОК, синтезированной методом горячего прессования.

3. Изучение распределения элементов — имитаторов радионуклидов между фазами показало, что основными концентраторами этих компонентов в образцах являются: цирконолит для Zr; голландит для Ba, Cs, Co, Ni; перовскит и голландит для Sr; цирконолит и перовскит для редкоземельных элементов. При наличии повеллита на него приходится практически все количество Mo, а также заметная часть Sr, Ba и Cs.

4. В целом полученные керамики характеризуются большим сходством с зарубежными материалами, рассматриваемыми в качестве перспективных матриц для консервации радиоактивных отходов. Экспериментальное изучение устойчивости полученных керамик в условиях, моделирующих обстановку подземного захоронения радиоактивных отходов, является первоочередной задачей дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бетехтин А. Г. Минералогия. М.: Изд-во геол. лит-ры, 1950. 539 с.
- Власов В. И., Кедровский О. Л., Никифоров А. С. и др. Обращение с жидкими радиоактивными отходами в рамках концепции замкнутого топливного цикла//Back End Nucl. Fuel Cycle. Vienna: IAEA, 1987. Р. 109—117.

3. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 179 с.
4. Соболев И. А., Стефановский С. В., Лифанов Ф. А. Синтез керамики типа СИНРОК из расплава// Радиохимия. 1993. Т. 35. № 3. С. 99—105.
5. Myhra S., White T. J., Kesson S. E. X-ray photoelectron spectroscopy for the direct identification of Ti valence in $[Ba_xCs_y](Ti, Al)_{2x+y}Ti_{8-2x-y}O_{16}$ hollandites//Amer. Miner. 1988. V. 17. № 1. P. 161—167.
6. Pentinghaus H. To SYNROC Through Melting: Thermal Analysis, Thermogravimetry and Crystal Chemical Characterization of Phases//Proc. Intern. Seminar on Chemistry and Process Engineering for High-Level Liquid Waste Solidification. Jülich. 1982. V. 2. P. 713—731.
7. Reeve K. D., Levins D. M., Ramm E. J. et al. The Development and Testing of SYNROC-C As a High Level Nuclear Waste Form//Sci. Basis Nucl. Waste Manag. 1982. V. 6. P. 99—106.
8. Ringwood A. E. Safe disposal of high-level radioactive wastes//Fortschr. Miner. 1980. Bd 58. N. 2. P. 149—168.
9. Ringwood A. E., Oversby V. M., Kesson S. E. Immobilization of High-Level Nuclear Reactor Wastes in SYNROC. A current Appraisal//Nucl. and Chem. Waste Manag. 1981. V. 2. P. 287.
10. Ringwood A. E. Disposal of high-level nuclear wastes: a geological perspective//Miner. Magaz. 1985. V. 49. Pt. 2. № 351. P. 159—176.
11. Sombret C. G. Waste forms for conditioning high level radioactive solutions//The Geol. Dispos. of High Level Rad. Wastes. Athens, Theoph. Public. S. A. 1987. P. 69—159.

НПО «Радон»
ИГЕМ РАН

Поступила в редакцию
10.IV.1995

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 550.834

© 1996 г. А. Е. РОЗАЕВ, Ф. Ф. ГОРБАЦЕВИЧ

УПРУГО-АНИЗОТРОПНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД ПО РАЗРЕЗУ ВОРОТИЛОВСКОЙ ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ (ВГС)

Исследованы изменения плотности, скорости распространения продольных волн, характеристик анизотропии Пучеж-Катунской астроблемы по керну Воротиловской глубокой скважины, пробуренной через ее центральную часть до глубины 5,27 км. Приведены результаты анализа, позволившие, в частности, разделить разрез на 5 интервалов и показать, что влияние динамических последствий удара метеоритного тела простирается до глубины ~2 км.

Введение

Воротиловская глубокая скважина пробурена почти в самом центре Пучеж-Катунской кольцевой структуры, расположенной к северу от г. Нижний Новгород (рис. 1). В плане структура представляет собой ареал округлой формы диаметром ~80 км, в пределах которого отмечается интенсивное дробление и перемятие пород. Возраст структуры по радиологическим датировкам оценивается в 175 млн. лет (юрский период). Гипотеза о метеоритном происхождении структуры была выдвинута и обоснована в работах [7, 11, 12]. Ударная энергия взрыва оценена в них в $3 \cdot 10^{28}$ эрг. Предполагаемый размер метеорита оценен в 1,4 км, построена модель динамики процесса кратерообразования.

На разрезе, построенном по геологическим и геофизическим данным (рис. 2), обращает на себя внимание центральное поднятие фундамента Ar — Pg-возраста. По оценке общая величина вертикального перемещения пород составила 2,5 км. Породы фундамента представлены гнейсами и амфиболитами. В верхней части поднятия, где проходит ствол ВГС, породы сильно раздроблены и брекчированы. Воротиловская глубокая скважина, пройденная со сплошным отбором керна, вскрыла разрез до глубины 5374 м.

Методика испытаний

Ударное воздействие метеоритного тела значительного объема должно было оказать существенное влияние на свойства, в основном упруго-деформационные, первоначально монолитных пород кристаллического фундамента, поэтому представляется интерес провести анализ изменений упругих и других свойств пород по разрезу ВГС, вызванных метеоритным ударом.

Для этого нами выполнен сравнительно большой объем определений скорости распространения продольной (V_p) и сдвиговой (V_s) волн на образцах керна ВГС ультразвуковым методом [4]. Выборочно на небольшом числе образцов (около 20) методом акустополярископии [2] получены акустополяриграммы, матрицы скорости V_{ip} , коэффициент анизотропии B , измерен показатель эффекта линейной анизотропии поглощения (ЭЛАП) D [5]. Период между извлечением керна из скважины и испытаниями составил примерно 6 мес.

Метод акустополярископии предусматривает помещение кубического образца, изготовленного из анализируемой среды, на столик акустополярископа [3], между излучателем и приемником чисто поперечных линейно-поляризованных сдви-

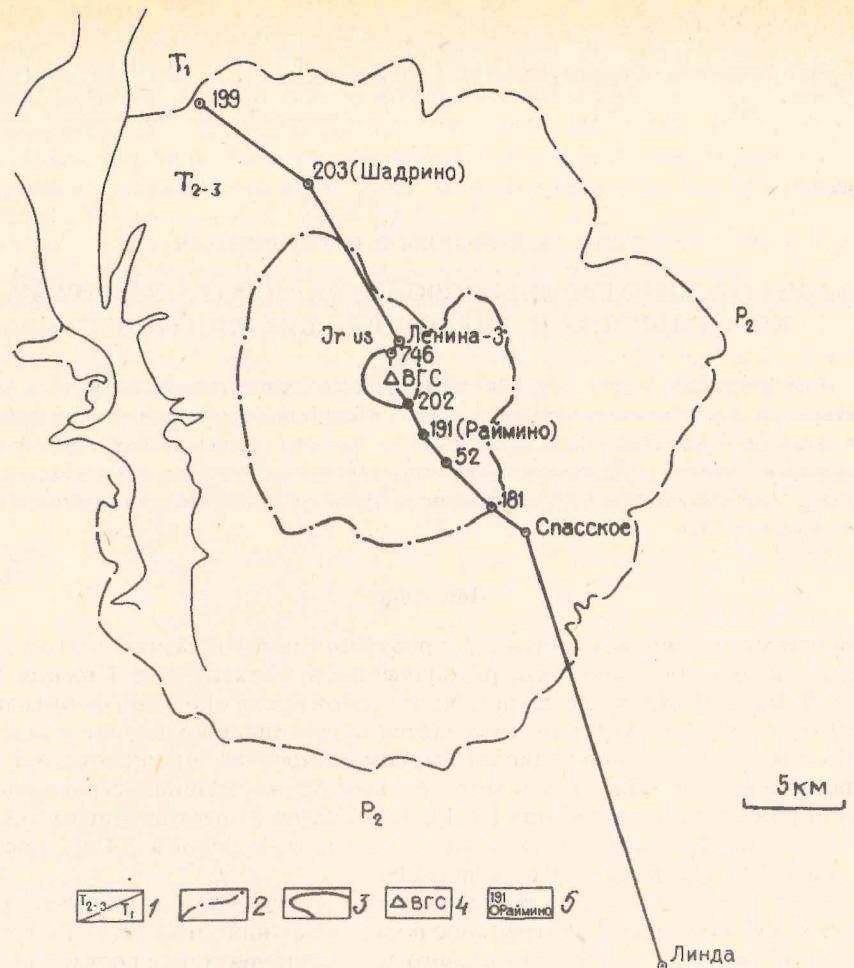


Рис. 1. План Пучеж-Катунской астроблемы со снятым чехлом перекрывающих отложений (составлен А. Ф. Кирьяковым): 1 — геологическая граница астроблемы; 2 — геологическая граница отложений конгломератобреекий и «перемятой толщи»; 3 — геолого-геофизическая проекция верхней границы центрального поднятия; 4 — расположение Воротиловской глубокой скважины; 5 — номера разведочных скважин и наименование населенных пунктов

ых колебаний. В процессе измерений амплитуды прошедших волн (огибающей гармонических колебаний или импульса) образец совершает поворот вокруг оси, общей для него и преобразователей, на угол 2π . В результате измерений получают круговые диаграммы (акустополяриграммы) изменений амплитуд прошедших образец ультразвуковых колебаний. Анализ акустополяриграмм, полученных при ориентации вектора поляризации колебаний, испускаемых излучателем, параллельно направлению вектора поляризации (наибольшей чувствительности) приемника (положение ВП), позволяет оценить наличие и степень ЭЛАП. Акустополяриграммы, полученные при скрещенных векторах (положение ВС), указывают на наличие и пространственное положение элементов упругой симметрии среды [2].

Коэффициент анизотропии B определяли при помощи менее трудоемкого варианта — методом экспресс-полярископии. На первом этапе определили направление проекций элементов упругой симметрии на трех гранях образца — куба (рис. 3). Затем, ориентируя вектор поляризации излучателя и приемника сдвиговых колебаний вдоль проекций, измерили скорости распространения

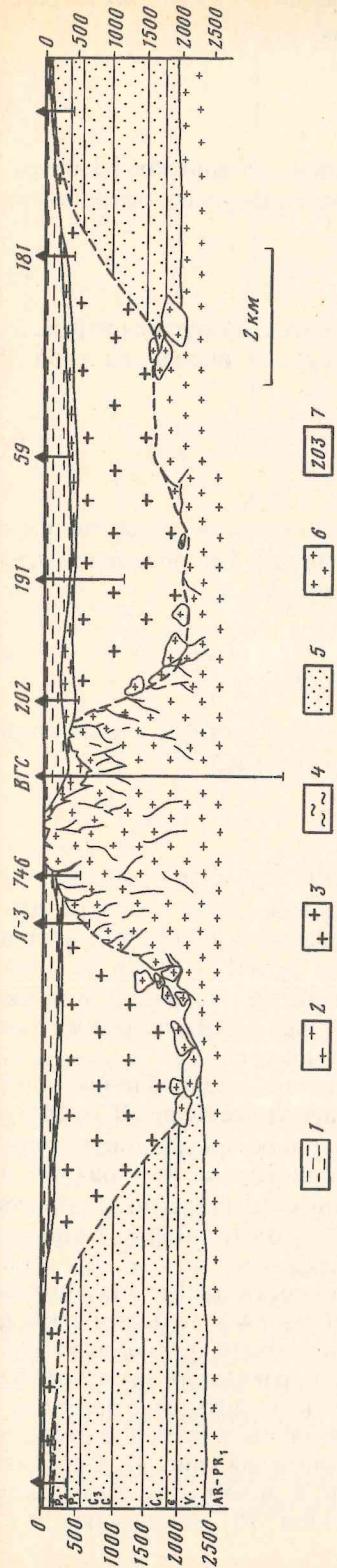


Рис. 2

Рис. 2. Схематический разрез через Пучеж-Катунскую астроблему (составлен А. Ф. Кирьяковым): 1 — породы перекрывающего и заполняющего комплексов, нерасчлененные; 2 — конгломератобреекий с обломками осадочных пород, кристаллических пород фундамента и импактитов; 3 — крупноглыбовая и глыбовая бреектия; 4 — сильно дислокированные породы донной части внешнего кратера «перемятая толща»; 5 — породы осадочного чехла московской синеклизы; 6 — породы фундамента (АГ — Пр); 7 — номера разведочных скважин

Рис. 3. Индексация направлений в кубических образцах из керна ВГС (направление 3 совпадает с вертикальной осью скважины)

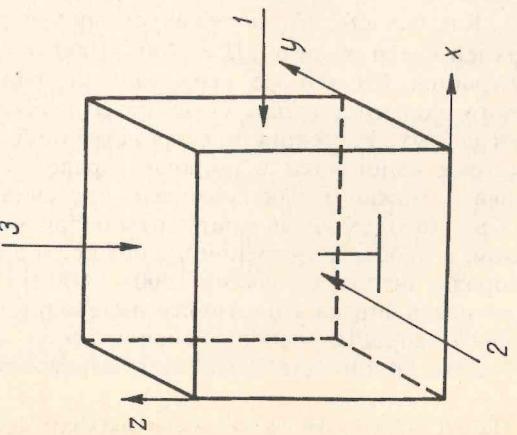


Рис. 3

сдвиговых колебаний V_{s1} и V_{s2} . Коэффициент анизотропии B_1 для первой грани куба (по нормали к направлению 1) вычисляли по формуле [15]

$$B_1 = \frac{2(V_{s2} - V_{s1})}{V_{s1} + V_{s2}}. \quad (1)$$

Коэффициент B_2 и B_3 определяли аналогичным образом. Общий коэффициент анизотропии образца как среднее геометрическое коэффициентов анизотропии по каждой грани равен:

$$\bar{B} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}. \quad (2)$$

Так как образцы были отобраны ориентированными относительно вертикали (рис. 3), нами на образцах с отчетливо проявившейся анизотропией определен угол Ψ между нормалью к плоскости анизотропии и осью керна:

$$\Psi = \arccos \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta_{n1} + \operatorname{tg}^2 \beta_{n2} + 1}}, \quad (3)$$

где β_{n1}, β_{n2} — соответственно углы между проекцией плоскости анизотропии и плоскости, нормальной к оси скважины на грани 1 и 2. Также был определен угол γ между нормалью к плоскости сланцеватости и осью керна:

$$\gamma = \arccos \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma_{n1} + \operatorname{tg}^2 \gamma_{n2} + 1}}, \quad (4)$$

где γ_{n1}, γ_{n2} — углы между проекцией плоскости сланцеватости и плоскостью, перпендикулярной оси скважины, соответственно на грани 1 и 2¹.

Результаты исследований

Результаты измерений и определений плотности σ и скорости V_p до глубины 2000 м даны на рис. 4. Акустополяриограммы образцов верхней части разреза представлены на рис. 5. Результаты расчетов и определений плотности σ , матриц скорости V_{ip} , коэффициента анизотропии \bar{B} , показателя ЭЛАП Д, углов Ψ , γ для некоторой части образцов приведены в таблице и на рис. 6. На рис. 6, в также приведена кривая, отражающая изменения углов τ между вертикалью и осью скважины, полученная в результате проведения инклинометрии.

Согласно данным рис. 4, основная зона разуплотнения, раздробления пород фундамента, если судить по показателям σ и V_p , расположена до $H = 700$ м. Глубже этой отметки наблюдается сравнительно монотонное повышение величин σ и V_p . Как показывает анализ акустополяриграмм брекчиевидных гнейсов (рис. 5), в верхней части разреза ($H = 700$ —1000 м) регистрируется малая доля упругой анизотропии. На это же указывает коэффициент $B = 0,033$ — $0,083$, величина которого находится около значения, отделяющего слабоанизотропные породы от анизотропных. Рассеяние пространственной направленности элементов упругой симметрии изменяется в широких пределах ($\Psi = 21^\circ \div 84^\circ$). В целом породы интервала можно характеризовать как сильно неоднородные, слабоанизотропные. Крупнобломочные фрагменты первичных пород, перемешанные случайным образом, в процессе аккреции превращены в сравнительно плотный агрегат.

Породы интервала глубин 1000—1600 м сцеплены в большей степени, их плотность близка к плотности полевошпатовых минералов (рис. 4), а средние величины скорости распространения продольных волн в целом отвечают диапазону, характерному для сильно метаморфизованных пород [10]. Анализ акустополо-

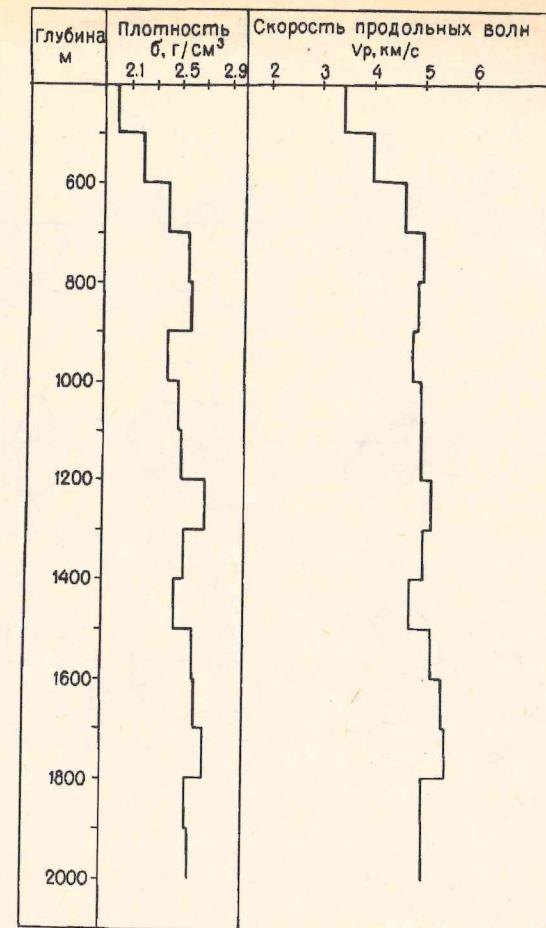


Рис. 4. Фрагмент упруго-плотностного разреза ВГС

ляриграмм образцов пород этого интервала, например тагамита² и гнейса меланократового, также указывают на преимущественное влияние неоднородностей, обусловленных случайнym перемешиванием фрагментов первичных пород. Взаимная ориентировка элементов упругой симметрии в фрагментах находится в широком диапазоне углов, так как в направлениях, через которые проходят элементы симметрии, в положении ВС (векторы скрещены) фиксируется сравнительно большая амплитуда [6]. Суммарная анизотропия в образцах очень слабая, показатель анизотропии $B = 0,022$ — $0,033$.

Еще менее анизотропны образцы брекций амфиболитов и гнейсов, для которых характерно значительное проявление эффекта линейной анизотропии поглощения. Для данных образцов, судя по взаимной направленности больших осей акустополяриграмм ВП (векторы параллельны), характерен линейный тип ЭЛАП [5], обусловленный, вероятнее всего, односторонней ориентированной вытянутых зерен амфибила. Для этой пары образцов коэффициент анизотропии B равен $0,012$ — $0,026$.

Практически изотропными ($B = 0,004$ — $0,016$), за счет большего дробления на еще более мелкие фрагменты, являются образцы гнейса, амфиболита и брекций

² Тагамиты представляют собой переплавленные от удара плагиоклазодержащие импактные минеральные ассоциации. Встречаются в ряде астроблем России и Канады [11].

¹ Положения проекций плоскости сланцеватости определяли канд. геол.-мин. наук Ж. А. Федотов.

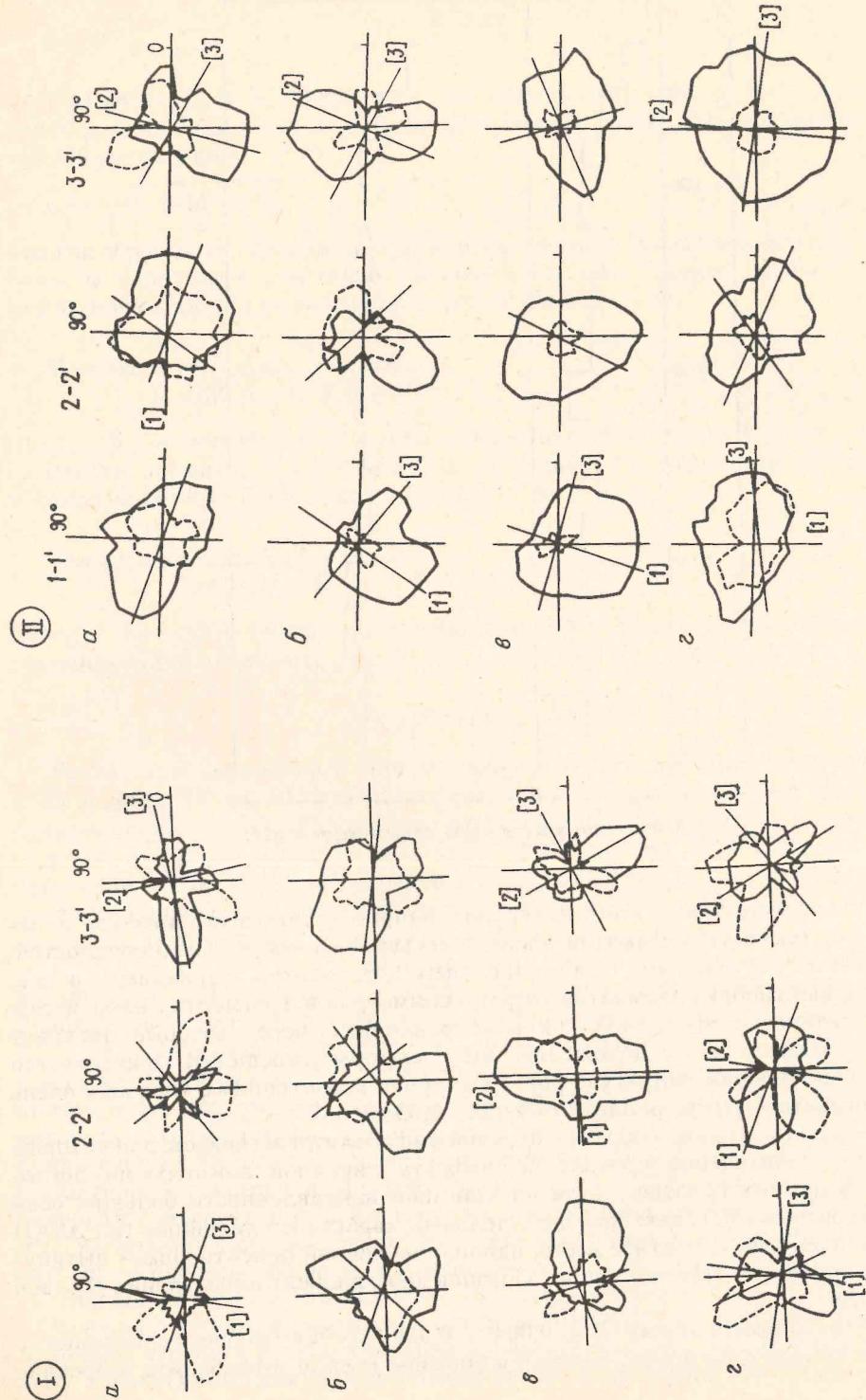


Рис. 5. Акустополяриграммы образцов верхней части разреза ВГС (сплошная линия – векторы параллельны, пунктиры – векторы скрещены). I – интервал глубин 771–971,6 м; а – гнейс, б – брекция гнейсов, в – тагматит, г – брекция амфиболитов и гнейсов; II – интервал глубин 1040–1337 м: а – гнейс меланократовый, б – брекция амфиболитов и гнейсов, в – брекция амфиболитов и гнейсов, г – гнейс.

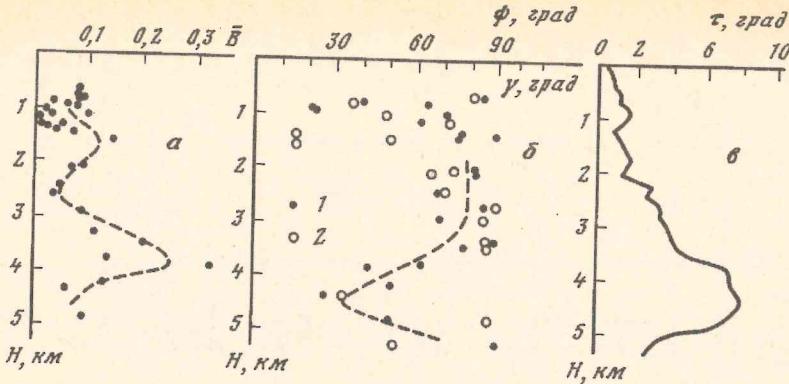


Рис. 6. Изменчивость характеристик анизотропии с увеличением глубины H отбора образцов керна ВГС: а – показатель упругой анизотропии \bar{B} , б – углы Ψ и γ (1 – Ψ , 2 – γ); в – угол τ отклонения скважины от вертикали

гнейсов. По их акустополяриграммам элементы упругой симметрии не выявляются, что указывает на общую разориентированность их фрагментов, наличие неоднородностей. Этот вывод подтверждается соотношениями величин в матрицах V_{ij} (таблица) и показателем \bar{B} (рис. 6, а). Начиная с глубин 1100 м угол между нормалью к плоскости анизотропии и осью керна Ψ в среднем выдерживается. Это свидетельствует о выдержанном, субгоризонтальном направлении стресса, оказавшего влияние на формирование упругой анизотропии пород. Однако в пределах глубин 700–1600 м корреляции между углами Ψ и γ отсутствуют (рис. 6, б). Таким образом, приведенные данные подтверждают, что после падения метеоритного тела естественная стратификация и структура пород в месте расположения ВГС была нарушена до глубины ~1600 м.

Интервал 2000–3000 м сложен плотными породами с обычными для гнейсов скоростными характеристиками (таблица, рис. 4). Акустополяриграммы и показатель анизотропии B (рис. 6, а) позволяют характеризовать породы интервала как однородные и слабоанизотропные. Углы Ψ и γ в среднем равны 78° и коррелируют между собой (рис. 6, б). Большие значения углов Ψ и γ также свидетельствуют о горизонтальной направленности и тектонической природе основной компоненты поля палеонапряжений в этом интервале глубин.

В породах, залегающих ниже $H = 3$ км, преобладают сравнительно плотные ($\sigma = 2,51–3,22 \text{ г}/\text{см}^3$) однородные породы; их акустополяриграммы имеют правильные очертания.

В интервале глубин ~4 км упругая анизотропия пород очень значительна, показатель \bar{B} (рис. 6, а) вырастает до значений 0,13–0,32. Повышение показателя \bar{B} сопровождается снижением величин углов Ψ и γ . Обычно такое сочетание параметров сопровождается резким увеличением кавернозности ствола скважины.

На глубинах 4,5 км угол между нормалью к плоскости анизотропии (сланцеватости) и осью скважины приблизительно равен 30° . Затем, ближе к $H = 5$ км, углы Ψ и γ снова возрастают. Вполне вероятно, что на глубинах $H \sim 4,5$ км расположена точка поворота направленности главной компоненты палеонапряжений от субгоризонтальной к наклонной на больших глубинах.

Самые глубинные ($H > 4,5$ км) породы представляют собой чередование сравнительно массивных (пиroxениты, долериты) и текстурированных (gneiss), однако по данным акустополярископии в тех и других зарегистрирована вполне отчетливая анизотропия, обычная для пород архейского комплекса [9]. Например, образец долерита массивного сравнительно однороден, слабоанизотропен. Он характеризуется проявлением акустического дихроизма по всем трем граням, обусловленного, вероятно, контрастом акустических свойств на границах лейко-

Упруго-анизотропные свойства некоторых образцов Воротиловской глубокой скважины

№№ п/п	Наименование породы	Номер образца	Глубина отбора <i>H</i> , м	Плотность <i>σ</i> , г/см ³	Матрица скорости <i>V_{ij}</i> , км/с	Коэффициент анизотропии <i>B</i>	Показатель ЭЛАП, Δ	Угол ψ	Угол сланцеватости γ
1	Брекчия гнейсов	В-2233	771,2	2,47	4,45 2,76 2,80	2,83 4,69 2,69	2,67 2,84 4,51	0,076 0,14 0,23	39
2	Тагамит	В-2788	900,4	1,87	4,36 2,57 2,58	2,53 4,21 2,50	2,56 — 4,22	0,033 0,04 0,30	—
3	Брекчия амфиболитов и гнейсов	В-2947	931,8	2,41	4,17 2,60 2,64	2,53 4,37 2,63	2,53 2,57 4,41	0,057 0,22 0,46	21
4	Гнейс ожелезненный	В-3084	971,6	2,36	3,78 2,26 2,18	2,30 3,54 2,34	2,26 2,23 3,82	0,074 0,3 0,15	22
5	Гнейс меланократовый и гнейсов	В-3442	1040,2	2,53	4,36 2,58 2,62	2,53 4,32 —	2,56 2,63 4,37	0,022 0,05 0,33	—
6	Брекчия амфиболитов и гнейсов	В-3637	1080,0	2,58	4,78 2,75 2,68	2,74 4,73 2,74	2,72 2,72 4,72	0,026 0,045 —	—
7	Гнейс	В-3931	1146,8	2,41	4,37 2,65 2,66	2,66 4,38 2,62	— 2,66 4,42	0,004 0,03 0,27	—

№№ п/п	Наименование породы	Номер образца	Глубина отбора <i>H</i> , м	Плотность <i>σ</i> , г/см ³	Матрица скорости <i>V_{ij}</i> , км/с	Коэффициент анизотропии <i>B</i>	Показатель ЭЛАП, Δ	Угол ψ	Угол сланцеватости γ
8	Брекчия гнейсов	В-5007	1337,0	2,50	5,14 3,04 3,10	3,11 4,94 3,06	3,11 3,01 5,14	0,016 0,18 0,07	—
9	Гнейс субвертикальной полосчатости	ВО-59	2061,4	2,51	5,17 2,95 3,17	2,99 4,47 2,97	3,18 2,98 5,09	0,09 0,28 0,03	81 77 73
10	Гнейс со слабо выраженной субвертикальной полосчатостью	ВО-304	3473,4	2,81	5,76 3,16 3,58	3,16 4,86 3,02	3,51 3,22 5,67	0,20 0,00 0,09	77 86 —
11	Долерит массивный	ВО-415	4207,4	2,95	4,49 3,27 3,20	3,09 5,21 3,03	3,32 3,01 4,82	0,12 0,20 0,23	51 —
12	Гнейс меланократовый косополосчатый вторично измененный	ВО-545	5273,2	2,91	5,20 3,19 3,45	3,00 5,32 3,06	3,35 3,29 5,52	0,13 0,66 0,59	89 52 —

4*

кратовых и меланократовых зерен. Акустополяриграммы указывают на несогласованность направленности проекций элементов упругой симметрии с направлениями нормалей к граням образца. Ориентировка плоскости сланцеватости и направления линейности не просматриваются. Образец гнейса меланократового косополосчатого однороден, анизотропен, с проявлением акустического дихроизма в сильной степени на гранях 1 и 2, также, вероятно, связанного с контрастом свойств на границах зерен разных минералов. Обращает на себя внимание несовпадение ориентировки плоскостей упругой симметрии и сланцеватости по углам Ψ и γ .

Отмеченные особенности дают основание полагать, что последний этап метаморфических преобразований в одинаковой степени изменил упругие свойства как гнейсов, так и пироксенитов и долеритов после внедрения последних.

Очень интересны результаты совместного анализа графиков на рис. 6, а, б, в. На начальных глубинах, в пределах зоны брекчированных пород, угол τ отклонения скважины от вертикали находится в диапазоне $0-2^\circ$. В интервале 2–3 км, при сравнительно невысоких коэффициентах \bar{B} и углах Ψ между нормалью к плоскости анизотропии и осью скважины, угол τ вырастает до 4° . В интервале резкого возрастания коэффициентов \bar{B} ($H = 3 \div 4$ км), при повороте плоскости анизотропии и приближении величины Ψ к 45° , наблюдается резкое увеличение угла τ до $\approx 8^\circ$. В интервале $H > 4,3$ км, при резком падении величины коэффициента \bar{B} и увеличении угла Ψ , происходит такое же резкое снижение угла τ . В целом же наблюдается явная корреляция изменений углов Ψ и τ по глубине.

Известно, что при бурении в наклонных слоях анизотропных пород ось скважины отклоняется в направлении нормали к плоскости слоистости (сланцеватости) [1]. Величина этого отклонения, как свидетельствуют данные рис. 6, зависит от степени анизотропии пород и от угла наклона плоскости анизотропии пород к оси скважины. Полагая, что наибольшее отклонение скважины от вертикали будет наблюдаться при $\Psi = 45^\circ$, можно предложить эмпирическое выражение для расчета прироста угла τ на интервал глубины h :

$$\tau_g = Kh\bar{B}_{cp} \sin 2\Psi, \quad (5)$$

где K — коэффициент пропорциональности (град/м); h — величина расчетного интервала (м); B_{cp} — средний для интервала коэффициент анизотропии. Для условий Воротиловской скважины $K = 0,053$ град/м.

По нашему мнению, формула (5) может быть полезна при оценке отклонений глубоких и сверхглубоких скважин, проходимых в анизотропных породах, от вертикали.

Анализ результатов

Анализируя в целом данные по разрезу Воротиловской глубокой скважины до глубины 5,27 км, можно выделить пять интервалов.

В первом интервале ($H < 0,7$ км) залегают брекчированные породы с пониженными скоростными характеристиками и показателями плотности.

В пределах глубин 0,7–0,97 км находятся изотропные и анизотропные, неоднородные, брекчированные породы. Показатели плотности и скорости распространения упругих волн в них приближаются к показателям, характерным для скальных пород. Имеющиеся следы ударного метаморфизма не позволяют выделить направление внедрения метеоритного тела ввиду послеударного перемешивания фрагментов. Ниже, до глубины 1,6 км, породы также брекчированы, с признаками ударного метаморфизма, однако по мере увеличения глубины они становятся более однородными, изотропными. Зафиксированные в них более высокие значения плотности и скорости распространения упругих волн объясняются, скорее всего, гравитационным уплотнением.

Третий интервал ($H = 2 \div 3$ км) представлен слабонарушенными, мета-

морфизованными породами, сходными по плотностным и упругим свойствам, параметрам анизотропии и элементам залегания. Их сланцеватость и плоскость анизотропии, как правило, субвертикальны. Это является признаком метаморфических процессов, имеющих тектоническую природу и прошедших, вероятно, до удара.

В интервале от 3 до 4,3 км залегают сильноанизотропные метаморфизованные породы. С увеличением глубины происходит поворот плоскости анизотропии от почти вертикального до положения с небольшим наклоном к горизонту. Вполне правдоподобно, что на глубине 4,5 км главная компонента поля палеонапряжений претерпела резкий поворот своего направления.

Для интервала 4,3–5,27 км характерны уменьшение анизотропии пород и поворот главной компоненты поля палеонапряжений ближе к субгоризонтальному направлению по мере возрастания глубины.

Заключение

Внедрение метеоритных тел в атмосферу Земли, как показывают наблюдения, происходит со скоростью более 10 км/с [13]. При этом основная энергия расходуется на дробление, рассеяние, нагрев, фазовые превращения и испарение вещества соударящихся тел. Процесс соударения с поверхностью Земли длится очень короткое время. Вне зоны дробления, под астроблемами в крепких кристаллических породах возможно образование трещин и кластических даек большой протяженности. Породы претерпевают существенный нагрев и термическую переработку [8].

В районе расположения Воротиловской глубокой скважины удар метеорита привел к разрушению и перемешиванию фрагментов пород на глубину более 1,6 км. Основная энергия удара реализована в этих пределах. Ниже структура и текстура пород не могли быть существенно изменены за очень короткое (с позиций геохронологии) время удара. Изменения пород на глубине до 3 км могут быть связаны с термическими воздействиями. Упругая анизотропия субвертикально-слоистых пород этого промежутка имеет доударную природу. Изменения угла наклона элементов упругой анизотропии пород отчетливо выделяют расположение дающего комплекса по разрезу ВГС. В целом же ниже отметки 2 км структурные, текстурные особенности, физические свойства разреза ВГС определяются в основном земными геолого-тектоническими процессами.

Пучеж-Катунская кольцевая структура является типичной для ударных кольцевых структур, образовавшихся в результате падения значительного по массе метеоритного тела [14]. Об этом свидетельствует наличие центральной горки, кольцевого вала выброса раздробленных пород, большого объема брекчированных пород, заполняющих центральную и периферийную части воронки взрыва. По-видимому, метеоритное тело полностью испарилось при ударе. Следует отметить, что характеристики Пучеж-Катунской астроблемы близки к характеристикам астроблемы Siljan (Швеция) [16], для которой к настоящему времени разработаны подробные модели ударных процессов и этапов образования кратера.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Ж. А. Федотова, А. К. Воронцова и А. Ф. Кирьякова за предоставление части материалов и плодотворное обсуждение результатов исследований. В части разработки экспресс-метода оценки упругой анизотропии данная работа выполнена с привлечением средств по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 5-94-16034).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахвалов А. И., Пономарев В. Н., Смолин П. П. и др. Магнитометрические исследования Кольской сверхглубокой скважины // Сб. геология. 1989. № 9. С. 81–87.
- Горбацевич Ф. Ф., Балаганский В. В., Иванова Н. Г. Акустополяриметрия и определение упругой симметрии горных пород. Методические рекомендации. Апатиты: Кольский науч. центр АН СССР, 1990. 84 с.

3. Горбацевич Ф. Ф. Акустополярископ для измерения упругости твердых сред: Авт. свид. 1281993, МКИ G 01 № 29/04//Б. И. 1987. № 1.
4. Горбацевич Ф. Ф. Определение скорости распространения продольных и поперечных колебаний в образцах горных пород. Методические рекомендации. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1982. 16 с.
5. Горбацевич Ф. Ф. Анизотропия поглощения сдвиговых колебаний в горных породах//Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 5. С. 70—79.
6. Горбацевич Ф. Ф., Козловская О. В., Розаев А. Е., Шамрай Г. И. Инженерно-геологическая характеристика пород разреза Уральской сверхглубокой скважины//Геоэкология. 1993. № 5. С. 66—74.
7. Масайтис В. Л. Астроблемы на территории СССР//Сов. геология. 1976. № 11. С. 52—64.
8. Мащак М. С., Федорова И. Г. Состав и условия образования кластических даек в тагамитах Попигайской астроблемы//Метеоритика. М.: Наука, 1987. Вып. 46. С. 124—135.
9. Митрофанов Ф. П., Яковлев Ю. Н., Смирнов Ю. П. и др. Архейский комплекс в разрезе СГ-3. Апатиты: Кольский науч. центр АН СССР, 1991. 186 с.
10. Петрофизика. Горные породы и полезные ископаемые. Т. 1. М.: Недра, 1992. 391 с.
11. Фельдман В. И. Петрология импактитов. М.: Недра, 1990. 304 с.
12. Фирсов Л. Ф. О метеоритном происхождении Пучеж-Катунского кратера//Геотектоника. 1965. № 2. С. 106—117.
13. Цветков В. И. Сихотэ-Алинский метеоритный дождь: дробление, рассеяние, траектория, орбита//Метеоритика. М.: Наука, 1987. Вып. 46. С. 3—10.
14. Хрянина Л. П. Метеоритные кратеры на Земле. М.: Недра, 1987. 112 с.
15. Clark A. V., Mignogna R. B., Sanford R. Y. Acoustoelastic measurements of stress and stress intensity factors around crack tips//Ultrasonics. 1983. № 3. Р. 57—64.
16. Deep drilling in crystalline bedrock. V. 1: The deep gas drilling in the Siljan impact structure, Sweden. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 363 p.

ГИ ГНЦ РАН

Поступила в редакцию
19.VIII.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 624.131.543

© 1996 г. О. В. ЗЕРКАЛЬ, Э. В. КАЛИНИН, Л. Л. ПАНАСЬЯН

ВЛИЯНИЕ ОБВОДНЕНИЯ МАССИВА ЛЁССОВЫХ ПОРОД НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ

Прогнозирование оползней в лёссых породах аридной зоны Таджикистана проводилось без учета изменения напряженно-деформированного состояния лёссов при их обводнении. Недоучет влияния обводнения лёссов на устойчивость склонов, несмотря на проводившиеся длительное время режимные наблюдения, не позволил прогнозировать развитие серии катастрофических сейсмогенных оползней, сформировавшихся при Гиссарском землетрясении 1989 г. Выполненное математическое моделирование влияния обводнения массива лёссых склонов на их напряженно-деформированное состояние показало, что накопление инфильтрационных вод в массиве лёссов приводит к перераспределению напряжений и формированию вблизи верхней границы горизонта увлажнения зон растягивающих напряжений. Развитие растягивающих напряжений при обводнении сопровождается резким снижением прочности лёссов и приводит к значительному уменьшению устойчивости склонов.

23 января 1989 г. в 5 час. 02 мин. местного времени в 8 км юго-западнее г. Душанбе, в северной части плато Уртабоз произошло Гиссарское землетрясение. Его магнитуда составила 5,5, гипоцентр по инструментальным данным располагался на глубине 5—7 км, интенсивность сотрясения в эпицентре достигала 7—8 баллов (по 12-балльной шкале). В эпицентральной зоне землетрясения образовалась серия сейсморазрывных дислокаций и сформировались четыре сейсмогенных оползня, наиболее крупными из которых являются оползни-потоки «Окули» и «Шарора» [2]. Развитие оползней повлекло человеческие жертвы и нанесло существенный материальный ущерб. Формирование оползневых деформаций в северной части плато Уртабоз, несмотря на проводившиеся длительное время режимные наблюдения за состоянием лёссых массивов, явилось в определенной мере «неожиданным». Одной из причин, не позволивших заблаговременно прогнозировать развитие оползней, можно считать недоучет влияния на устойчивость склонов обводнения массива лёссов за счет длительной (более 20 лет) эксплуатации оросительной системы в северной части плато Уртабоз. В данной работе предпринята попытка оценить влияние обводнения на изменение напряженно-деформированного состояния склона, слагаемого лёссыми породами, что в конечном итоге позволит оценить воздействие обводнения на устойчивость склона в целом. Полученные данные позволяют дополнить существующие представления о влиянии обводнения на устойчивость лёссых склонов, выражающемся в значительном снижении прочностных характеристик при росте влажности [2].

Задачи и объект моделирования. В настоящее время методы математического моделирования в практике изучения оползневых процессов находят все большее применение, так как они дают возможность исследовать механизм развития оползневых деформаций, оценить основные оползнеобразующие факторы и закономерности их изменения, прогнозировать развитие оползневых деформаций [1, 3, 4]. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, слагающих склон, численными методами имеет известные преимущества по сравнению с традиционными приближенными ме-

тодами расчета общей устойчивости склонов. В частности, такие характерные особенности оползневых склонов, как неоднородность строения, сложность геометрических очертаний, разнообразие силовых воздействий, могут моделироваться без существенного упрощения расчетной схемы. Кроме того, имеется возможность проследить перераспределение напряжений в склоне, приводящее к потере устойчивости. Основной задачей математического моделирования было выявление роли снижения деформационных свойств лёссов при обводнении в изменении напряженно-деформируемого состояния склона, которое может привести к развитию оползневых деформаций.

В качестве объекта моделирования был избран оползень «Шарора». Это обусловлено тем, что в формировании оползня отражается все разнообразие особенностей развития сейсмогенных оползней при Гиссарском землетрясении 1989 г.

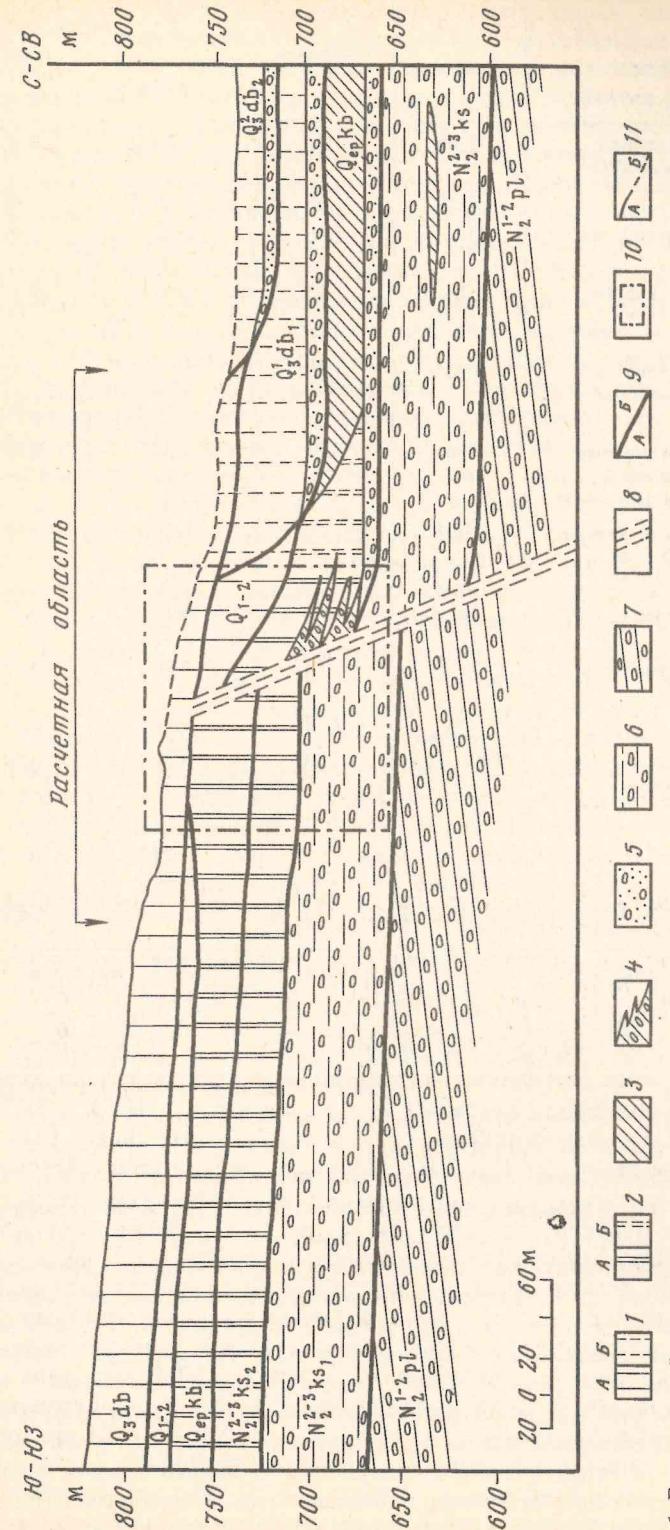
Оползень «Шарора» сформировался в нижней части северного склона плато Уртабоз, где пологая (от 7 до 12°) поверхность возвышенности резко понижается в сторону Гиссарской долины (рис. 1). Высота уступа крутизной 22—25° достигает 45 м. Слагается склон лёссами, мощность которых составляет 73 м. В Гиссарской долине, у подножья плато, мощность лёссов уменьшается до 43—44 м. В толще лёссов содержится до 10 горизонтов «палеопочв», характеризующихся повышенной по сравнению с лёссыми глинистостью, значительно меньшими значениями коэффициентов фильтрации. В толще лёссов на глубинах от 8—9 до 22—24 м была вскрыта зона повышенного увлажнения, в пределах которой влажность лёссов достигает 29—32%. Формирование этой зоны, по-видимому, связано с инфильтрацией вод при орошении сельхозугодий, расположенных на склоне плато, и из магистрального канала ТМ-1, проложенного у бровки склона и эксплуатировавшегося без гидроизоляции. Лёссовые породы в пределах плато Уртабоз подстилаются конгломератами неогенового возраста, а в Гиссарской долине лёссовидные суглинки залегают на аллювиальных плейстоценовых валунно-гачниковых отложениях.

Оползень «Шарора» имеет сложную, почти прямоугольную форму, ширину до 1,1 км и среднюю длину оползневого тела до 370 м. Тело оползня делится на три части — восточную, центральную и западную. Краевые части оползня имеют одинаковое строение. Высота стенки отрыва в восточной части оползня составляет 10—11 м, в западной — 5—6 м при общем превышении ненарушенной части склона над его подошвой 40—45 и 38—40 м соответственно. В краевых частях оползня выделяются два участка — головной и языковый. Головная часть имеет блоковое строение. Длина отдельных блоков, ориентированных вдоль стенки отрыва, составляет от 45 до 70 м при ширине от 3—6 до 11—15 м. Языковая часть представляет собой вязко-пластичный оползень-поток мощностью 1,2—1,3 м, возрастающей в понижениях дооползневого рельефа до 2—3 м. Протяженность языковой части оползня «Шарора» составляет 210—260 м. Центральная часть оползня разделяет западную и восточную и отличается от них отсутствием языковой части в виде оползня-потока. Имея, так же как и краевые части оползня, участок блокового скольжения, центральная часть вместо языка оползня включает вал выпирания высотой 8 и длиной до 170 м.

Формирование оползня «Шарора» произошло за очень короткое время. По свидетельствам очевидцев, время смещения не превышало 1 мин. Общий объем оползня «Шарора» оценивается в 5,2—5,5 млн. м³. Объем разжиженной толщи составил 2,0—2,3 млн. м³.

Схематизация объекта. Применение математического моделирования требует схематизации и упрощения реальных природных условий, выбора определяющих показателей физико-механических свойств грунтов и других особенностей, проводимых на основе изучения инженерно-геологических условий моделируемого объекта.

В результате изучения строения склона, свойств лёссовых и подстилающих их пород, слагающих склон на участке «Шарора», по ряду признаков, таких как



Обобщенные физико-механические свойства основных выделенных ИГЭ

ИГЭ	Описание породы	Возраст	Плотность, г/см ³	Модуль общей деформации Ед × 10 ⁴ МПа	Коэффициент Пуассона, отн. ед.
I	Лёссы — пылеватые суглинки, макропористые маловлажные	Q ₃ db	1,41	0,29	0,36
II	То же, обводненные	Q ₃ db	1,68	0,14	0,40
III	Пылеватые суглинки, пористые, маловлажные	Q ₁₋₂	1,45	0,32	0,36
IV	Каменные лёссы — пылеватые суглинки, пористые, очень плотные	Q _{ep}	1,65	0,81	0,37
V	Каменные лёссы — пылеватые суглинки и супеси, пористые, очень плотные	N ₂ ks ₂	1,69	1,13	0,32
VI	Конгломераты крупно-галечные, плохо сцементированные, с супесчано-глинистым цементом	N ₂ ks ₁	2,22	3,50	0,30
VII	Конгломераты средне-галечные, хорошо сцементированные, с известковистым цементом	N ₂ p ₁	2,37	4,00	0,30
IX	Пылеватые суглинки, неслоистые, влажные	Q ₃ db ₂	1,52	0,24	0,33
Xa	Валунно-галечники с супесчаным заполнителем	Q ₃ db ₁	2,10	0,90	0,30
Xb	То же	Q _{ep}	2,12	1,20	0,30
XI	Конгломераты средне- и мелкогалечные с известковистым цементом	N ₂ kn — p ₁	2,29	4,50	0,30

плотность, деформируемость, прочность, естественная влажность, было выделено 13 инженерно-геологических элементов — ИГЭ (таблица).

Для целей моделирования наибольший интерес представляют ИГЭ, слагающие верхнюю (до глубин 70 м) часть массива, I, II, III, IV и IX. ИГЭ I слагается лёссами душанбинского комплекса (Q_3db) — суглинками палевыми пылеватыми, пористыми, макропористыми, маловлажными ($W_e < W_p$, W_e и W_p — влажности естественная и нижнего предела пластичности). ИГЭ II выделяется во втором варианте расчета как обводненная часть ИГЭ I. Так же как и ИГЭ I, ИГЭ II представлен лёссами (Q_3db) — суглинками коричнево-палевого цвета, пылеватыми, пористыми, влажными ($W_e > W_p$). В ИГЭ III выделены среднеплейстоценовые лёссы иляксского комплекса (Q_2il) — суглинки палевые, пылеватые, пористые, маловлажные. К ИГЭ IV отнесены «каменные» лёссы эоплейстоцен-раннеплейстоценового возраста — суглинки красновато-палевые, пылеватые, очень плотные, с прослойками супесей и тяжелых суглинков. ИГЭ IX слагается суглинками коричневыми, коричневато-бурыми, плотными, в нижней части с прослойками темно-серых, серых глин и тяжелых суглинков, серых супесей и мелкозернистых песков. В отдельный инженерно-геологический элемент (ИГЭ VIII) выделена зона тектонического нарушения, для которой характерны большая деформируемость и пониженная прочность. Остальные ИГЭ — V, VI, VII, X, Xa, Xb и XI представлены разновозрастными конгломератами и валунно-галечниками с песчаным и супесчано-суглинистым заполнителем с прослойками песков и песчаников. Физические свойства, характерные для отложений каждого инженерно-геологического элемента, приведены в таблице.

Методика математического моделирования. Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород, слагающих северный склон плато Уртабоз, выполнялось для плоского сечения, расположенного в восточной части оползня «Шарора», ориентированного меридионально и последовательно пересекающего ненарушенную оползневыми деформациями часть склона плато, тело оползня и примыкающую к нему часть Гиссарской долины. Интерес для решения поставленной задачи представляет распределение напряжений в верхней части изученного массива — до линии с абсолютной отметкой 730 м, что на 20 м ниже подошвы оползня «Шарора» в головной части. При изучении распределения напряжений учитывалось неоднородное по составу строение толщи, различия в свойствах пород, наличие тектонических нарушений (зоны Иляксского разлома), а также собственный вес пород. При разбиении расчетной области узлы сетки размещались так, чтобы геологические границы располагались между узлами, т. е. на границах происходит резкое изменение свойств горных пород.

Расчет напряжений производился в упругой постановке, в предположении, что массив горных пород находится под действием только гравитационных сил, что соответствует состоянию массива до землетрясения. При составлении расчетных схем было рассмотрено два варианта состояния массива. В первом случае толща лёссов верхней части склона имеет незначительную влажность (до 10%), что соответствует состоянию массива лёссов до начала эксплуатации оросительной системы. Во втором случае в верхней части толщи лёссов появляется зона увлажнения, где влажность лёссов значительно превышает влажность нижнего предела plasticности ($W_e >> W_p$), что резко меняет физико-механические свойства лёссов. Такое состояние массива лёссов, вероятно, привело склон в состояние, близкое к предельному равновесию, которое предшествовало развитию оползневых смещений при Гиссарском землетрясении 1989 г.

Границы расчетной области размером 300 × 250 м задавались таким образом, чтобы нижняя граница на участке «Шарора» располагалась на отметке 550 м, что на 200 м ниже отметок долинной части участка. Боковые границы были удалены от бровки и основания изучаемого склона на расстояние, в 3 раза превышающее его высоту. Это выполнено для снятия влияния границ на решение внутри области. На нижней границе расчетной области было принято условие жесткого закрепления. На боковых границах были запрещены перемещения в горизонтальном направлении, но разрешены в вертикальном. Поверхность склона была свободна от напряжений. Весь массив был разбит на квадратные элементы с шагом 10 × 10 м. В центре каждого элемента располагался узел расчетной сетки (всего 31 × 26 узлов). В узлах сетки задавались показатели, характеризующие свойства пород в ячейке. Полученные значения напряжений относятся к элементарному объему, имеющему размер ячейки.

Для проведения расчета была применена одна из модификаций вариантно-разностного метода, в котором реализуется идея использования контурных точек [3]. В результате выполненных расчетов были определены вертикальные (σ_y), горизонтальные (σ_x), касательные (τ_{xy}) и главные (σ_{max} и σ_{min}) напряжения.

Результаты моделирования. Основные закономерности в распределении напряжений в склоне на участке «Шарора» обусловлены изменением свойств пород и расположением тектонических нарушений. В целом, увеличение вертикальных напряжений сжатия происходит с глубиной в соответствии с особенностями геологического строения. Абсолютные их значения до глубин 80—100 м не превышают 2 МПа. В дальнейшем, в связи с тем, что изменения напряженно-деформированного состояния на глубинах выше 100 м не представляют практического интереса, анализ распределения напряжений проводился в основном для верхней части расчетной области.

Наибольший интерес вызывает распределение горизонтальных напряжений (рис. 2), характерные особенности которых заключаются в следующем. В макропористых суглинках верхней части склона вблизи его бровки формируются

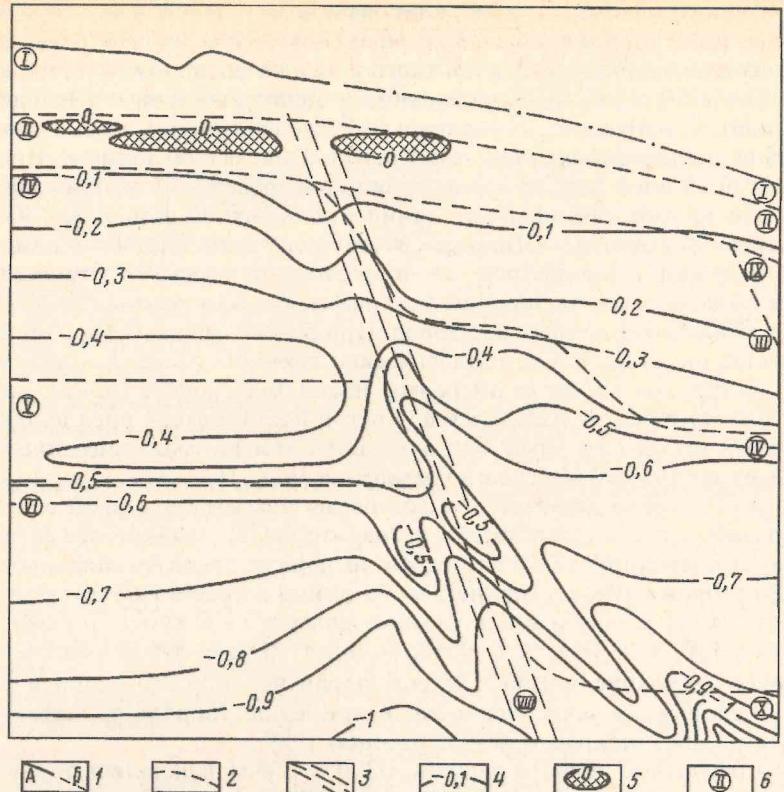


Рис. 2. Распределение горизонтальных напряжений на участке «Шарора» до обводнения склона: 1 — дневная поверхность; А — ненарушенная, Б — разрушенная оползнем; 2 — границы ИГЭ; 3 — Ильякский разлом; 4 — изолинии равных напряжений; 5 — зона растягивающих напряжений; 6 — номера ИГЭ

положительные (растягивающие) напряжения, при этом зоны растяжения отсутствуют до появления горизонта увлажнения, т. е. появления легко деформирующегося, подстилающего указанные лёссы слоя суглинков.

На глубине 30 м в массиве сухих лёссов (1-й вариант расчета — ИГЭ II идентичен ИГЭ I) формируется прерывистая зона растяжения. Протяженность двух участков развития растягивающих напряжений составляет 20 и 30 м, больший из которых располагается внутри склона, а меньший — вблизи поверхности склона. Напряжения растяжения локализуются в примыкающей с обеих сторон к разлому части массива лёссов.

Изменение деформационных свойств после увлажнения приводит к объединению участков растягивающих напряжений в единую значительно расширяющуюся (до 90 м) зону растяжения и ее продвижению в глубь склона дополнительно на 40 м (рис. 3). При этом практически вся образовавшаяся зона располагается выше разлома, несколько отступая от поверхности склона на два расчетных шага (20 м). Максимальные величины растягивающих напряжений достигают 0,03 МПа на расстоянии 1—2 расчетных мощностей зоны разлома. Учитывая, что лёссы породы практически «не работают» на разрыв, можно предположить, что подобные участки при сейсмическом воздействии могут являться местами зарождения оползневых деформаций.

В пределах рассматриваемого склона на глубинах 80—100 м в подошве субазральных (пылеватых) отложений имеется зона сжатия с повышенными напряжениями, достигающими 0,5—0,7 МПа при средних значениях напряжений, ха-

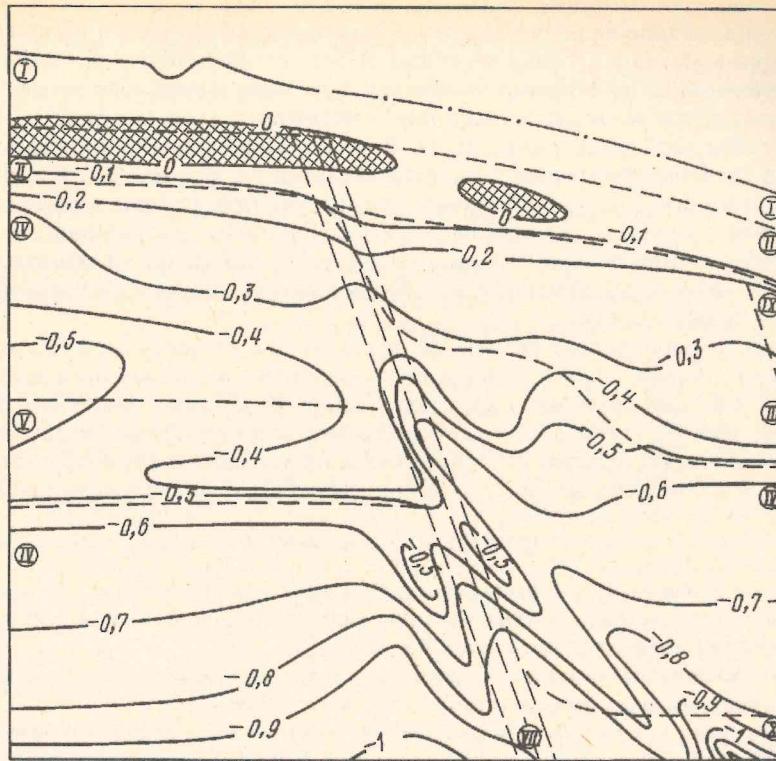


Рис. 3. Распределение горизонтальных напряжений на участке «Шарора» после обводнения склона (условные обозначения см. рис. 2)

рактерных для данных глубин, до 0,4 МПа. Особенностью этой зоны является снижение абсолютных значений напряжений на 20% при расчете напряженно-деформируемого состояния с учетом наличия зоны увлажнения (2 вариант). Вероятно, здесь часть напряжений «сбрасывается» за счет деформирования зоны растяжения в вышележащих лёссеах.

Анализ распределения максимальных касательных напряжений показывает, что если по абсолютным величинам эти напряжения в интересующей нас части разреза невелики, то относительные их характеристики имеют некоторые особенности. Так, после обводнения лёссов в том слое, где была развита зона растяжения, τ_{max} увеличиваются в ~2 раза, а над ним, в приповерхностной части склона, почти на порядок. Это обстоятельство (при предельных значениях прочностных показателей — сцепление $c = 0,03—0,02$ МПа при W_e , незначительно превышающей W_p) может привести к развитию трещин на поверхности склона.

В расчетном склоне максимальные нормальные напряжения в целом направлены в соответствии с действием гравитационных сил, субвертикально. Исключение составляют участки, граничащие с зонами растяжения. Для условий, когда в массиве лёссов отсутствует обводненный горизонт (1-й вариант расчета), в напряженно-деформируемом состоянии пород склона на участке «Шарора» обнаруживается изменение направления действия главных напряжений. Смена знака происходит на внешних границах развития зон растяжения, а углы отклонения действия напряжений от вертикали увеличиваются вблизи разлома и на расстоянии 30 м от бровки склона до 17° и 45° соответственно. После развития зоны увлажнения участки с большими углами (до 53°) отклонения от вертикали и сменой знака осей главных напряжений смещаются в сторону свободной поверхности склона, т. е. удаляются от его бровки.

Заключение. Проведенные расчеты показали, что техногенное обводнение лёссовых пород, сопровождающееся резким изменением деформационных и прочностных характеристик лёссов, слагающих склоны, приводит к перераспределению напряжений. В частности, обводнение лёссовых пород, слагающих склоны, приводит к развитию зоны растягивающих напряжений, располагающейся вблизи верхней границы горизонта увлажнения. Величина растягивающих напряжений в случае, если уровень грунтовых вод располагается на глубине ~10 м, достигает величин, сопоставимых с прочностными характеристиками увлажненных лессов, а в отдельных случаях — их превышающих. Развитие растягивающих напряжений при обводнении лёссов, которое также сопровождается резким снижением величины их прочности, приводит к значительному уменьшению устойчивости склонов, слагаемых лёссами.

В результате перераспределения напряжений появляются участки повышенной опасности с точки зрения возможности развития в дальнейшем оползневых деформаций или, по крайней мере, подготовки отдельных участков склона к потере устойчивости. Очевидно, что выявленные особенности поля напряжений в склоне на участке «Шарора», его изменчивости, сыграли немаловажную роль в формировании сейсмогенных оползней при Гиссарском землетрясении 1989 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаджиев М. Г., Панасьян Л. Л. Результаты изучения напряженного состояния массивов сложного строения расчетным методом // Напряженно-деформируемое состояние и устойчивость скальных склонов и бортов карьеров. Фрунзе: Илим, 1979. С. 76—82.
2. Зеркаль О. В. Сейсмогенные оползни Гиссарского землетрясения 1989 г., факторы их формирования и развития: Автoref. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.: МГУ, 1994. 21 с.
3. Калинин Э. В., Роот П. Э. Напряженное состояние высоких горных склонов в сейсмически активных районах // Вопросы инж. геологии и грунтоведения. Вып. 6. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 237—243.
4. Саттаров Б., Стажайко С. Ф. К вопросу расчета длины и скорости перемещения оползней-потоков в лёссовых породах // Вопросы инженерной геодинамики. Ташкент: САИГИМС, 1980. С. 30—38.

Федеральный центр геоэкологических систем
Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
24. IV. 1995

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

4 • 1996

УДК 624.131(571.121)

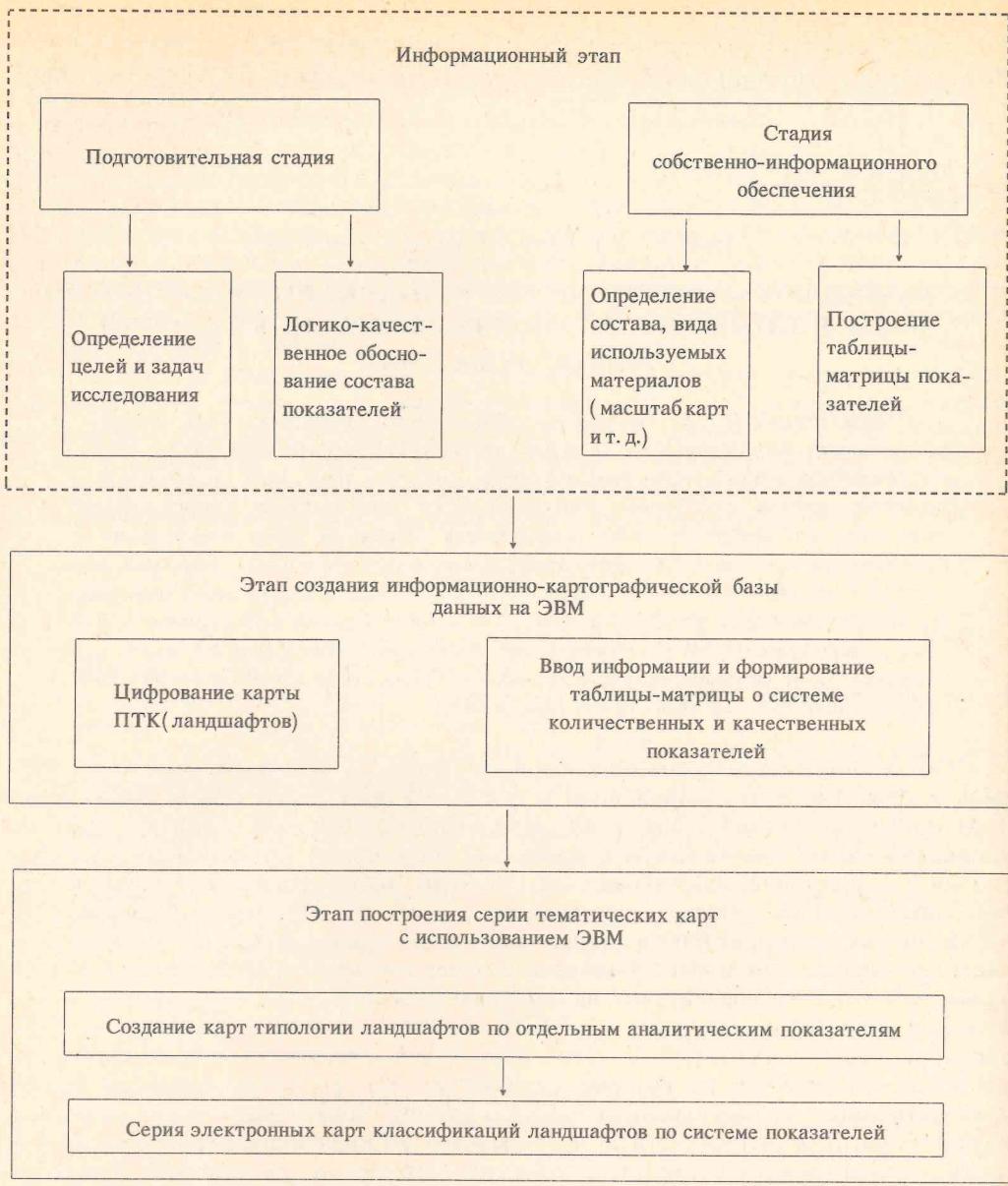
©1996 г. Т. Г. РЕШЕТНЕВА, С. В. ЧИСТОВ

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

Охарактеризованы два возможных направления оценочных исследований — аналитический и синтетический. За основу принят синтетический метод исследования, заключающийся в объединении природно-территориальных комплексов (ландшафтов) в оценочные группы, отражающие некоторый класс относительной благоприятности территории для конкретного вида использования. Определен набор качественных и количественных показателей, необходимых для выделения оценочных категорий при решении инженерно-геологических задач. Показана методика создания информационно-карографической базы данных инженерно-геологических условий, а на заключительном этапе — методика создания тематических карт, характеризующих ландшафты по отдельным показателям. Отражена возможность создания синтетической карты оценки на основе классификации ландшафтов по набору показателей.

Обострение экологических проблем в различных регионах послужило предпосылкой развития двух направлений в предпроектных разработках. Первое направление традиционно продолжает исследования оценочного характера условий предполагаемого строительства инженерных сооружений. Это наиболее разработанная и полностью обеспеченная нормативными документами часть предпроектных исследований. Второе направление предполагает анализ последствий, возникающих на территории в случае реализации предполагаемого проекта. Эта часть проектирования в последние годы связана с разработкой разделов с общим названием «Оценка воздействия на окружающую среду» (ОВОС). Нормативная база для разработки материалов в ОВОС находится в стадии становления. При решении любых инженерно-геологических задач сочетаются оба направления исследований, каждое из которых использует для расчетов конечный набор количественных и качественных характеристик, образующих блок исходной информации. Для получения итоговых выводов об инженерно-строительных качествах территории и возможном развитии негативных последствий требуется переработка исходной информации. Ее формирование и последующая переработка с получением карт соответствующего назначения могут быть организованы по-разному. Наиболее четкие различия связаны с двумя возможными путями в реализации оценочных исследований: аналитическим и синтетическим.

Аналитический путь оценочных исследований связан с изучением различных тематических карт, отражающих особенности компонентов природной среды (главным образом рельефа, грунтов, климата, растительности и т. д.). Развитие комплексных ландшафтных исследований позволило учитывать и оценивать межкомпонентные связи в природных системах разных иерархических уровней. Ландшафтные карты отдельных регионов, в том числе и Тюменской обл., послужили основой для создания синтетических карт оценки. В этом случае оценка заключается в определении хозяйственной ценности природно-территориальных комплексов (ПТК) в их естественных границах. Общей основой для разработки синтетических оценочных карт для различных целей являются объекты карто-



графирования — геосистемы или ПТК, а различия состоят в интерпретации этих геосистем в зависимости от требований со стороны конкретного вида освоения.

Основной методический прием при таком подходе состоит в объединении геосистем в оценочные группы, отражающие некоторый класс относительной благоприятности территории для конкретного вида использования. Обязательным свойством выделяемых групп должна быть содержательность, т. е. некоторый набор показателей, необходимых для получения представления об основных отличиях выделяемых оценочных категорий.

За основу в дальнейших исследованиях был принят синтетический метод исследования. В соответствии с поставленной целевой установкой весь цикл работ проводился в следующей последовательности (рисунок).

На первом этапе исследований на территории п-ва Ямал были выделены ландшафты (ПТК), сочетающие в себе сведения об инженерно-геологических условиях (геологическом и геоморфологическом строении территории, гидрологических и мерзлотных условиях, об инженерно-геологической характеристики пород, геологических процессах и явлениях), а также о климатических и геоботанических особенностях [9]. Использовалась карта природных комплексов севера Западной Сибири [5]. Всего в границах Ямала выделено 36 ландшафтов. Для каждого ландшафта значения параметров (показателей) были сняты с карт либо взяты из фондовых и опубликованных источников [1—6, 8]. Логико-качественное обоснование выбранных параметров содержится в табл. 1. Использование их в дальнейшем предполагает создание ряда классификаций ландшафтов для следующих целей:

инженерно-геологического обоснования различного вида строительного освоения (промышленно-гражданское и автодорожное строительство и строительство трубопроводов);

оценки устойчивости ландшафтов;

разработки прогнозных геоэкологических оценок.

На втором этапе была создана информационно-картографическая база данных, включающая в себя два основных блока: карту природных комплексов и таблицу их характеристик, представленную в схематическом виде для наиболее типичных ландшафтов данной провинции в табл. 2. Число параметров может меняться в зависимости от целевых установок конкретных оценочных исследований.

Апробация методики проведена для ключевого участка в южной части полуострова. Участок был оцифрован в полуавтоматическом режиме с помощью дигитайзера (планшетного типа) с ручным обводом и автоматической регистрацией координат. Использование карты ПТК в качестве источника информации для формирования структуры базы данных удобно и эффективно: сведения, считанные с карты, имеют четкую территориальную привязку к площадям операционных единиц в рамках границ ландшафтов.

Использовался программный продукт DIGITMAP (версия 1.14), разработанный на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова О. Р. Мусиным, С. М. Кошель, В. Н. Семиным, В. М. Шафоростовым. Система предназначена для цифрования, редактирования и хранения векторной картографической информации со встроенной базой данных. Имеется возможность обмена информацией (экспорт/импорт) с системами AUTOCAD, ARC/INFO и др.

Система предусматривает возможность послойного хранения цифровой информации в виде набора тематических слоев данных. Например, первый слой — тематическая основа карты (границы ландшафтов), второй — гидросеть, третий — координатная сетка и т. д. Можно выводить на экран монитора как один слой, так и совмещенные изображения по выбранным слоям.

Пакет программ DIGITMAP предусматривает хранение, в том числе и в табличной форме, текстовой информации с возможным воспроизведением ее на экране монитора. В итоге на втором этапе создана информационно-картографическая база данных, состоящая из цифровой карты ландшафтов и системы их качественных и количественных параметров.

На заключительном (третьем) этапе работ создавалась серия тематических карт, характеризующих ландшафты по отдельным показателям. Данная методика предполагает дифференциацию граничных условий на любые интервальные типы, отвечающие целям и задачам оценочных исследований. Каждые «субъекты» оценок предъявляют свои специфические требования к интерпретации геосистем, их типологии [10]. В зависимости от целей конкретного направления исследования, например для инженерно-геологического обоснования различного вида строительного освоения, необходимы определенный набор показателей и соответственно интервалы их граничных условий, отвечающих требованиям существующей нормативной документации (СНИПы, справочники и т. д.). Поэтому границы

Таблица 1

Логико-качественное обоснование показателей инженерно-геологических, климатических и геоботанических условий

Состав показателей	Логико-качественное обоснование состава показателей
Геологическое строение: геоструктурное положение; геолого-генетические типы отложений, их возраст; условия залегания и распространения отложений; типы четвертичных отложений, их характеристика	Влияют на формирование температурного режима пород, амплитуды колебаний температур и глубины сезонного промерзания-протаивания пород; определяют различия в формировании, условиях залегания и распространении ММП, их мощности и ярусности; определяют характер формирования криогенных текстур и жильных льдов; влияют на развитие геологических процессов и явлений, их динамику
Геоморфологические условия: характер и формы рельефа; преобладающие типы местностей, их характеристика; высотные уровни; относительные превышения	Влияют на дифференацию радиационно-теплового баланса поверхности, на условия теплообмена; определяют формирование мощностей многолетнемерзлых толщ, их распространение, влажностный режим; влияют на развитие геологических процессов и явлений
Мерзлотные условия: распространение ММП; мощность ММП; температура ММП; криогенное строение ММП; льдистость ММП; мощность слоя сезонного промерзания-протаивания пород, его тип	Влияют на развитие специфических форм микро- и мезорельефа, на формирование особых влажностных условий и специфических физических и прочностных свойств пород; определяют тепловые осадки при оттаивании, распущенность при промерзании, устойчивость инженерных сооружений и т. д.; определяют особые условия почвообразования и характер растительности; предопределяют развитие мерзлотных процессов и явлений
Гидрогеологические условия: распространение первого от поверхности водоносного горизонта, его характеристика; наличие криопэзлов	Корректируют геотермические условия формирования многолетнемерзлых пород, влияют на развитие криогенных процессов и явлений
Инженерно-геологическая характеристика пород: состав (минеральный, гранулометрический); криогенная текстура, объемная льдистость; естественная влажность; физико-механические свойства	Влияют на формирование влажностных условий, физических, прочностных и деформационных свойств пород; определяют устойчивость инженерных сооружений, развитие геологических процессов и явлений
Геологические процессы и явления: мерзлотные (пучение грунтов, солифлюкция и др.); эрзационные; обвально-осипные и оползневые; золовые и др.	Влияют на формирование специфических форм рельефа, трещинообразование, образование полигонально-жильных льдов, термокарстовых озер; меандрирование рек, развитие оврагов и т. д.
Климатические и геоботанические условия: климат (температура воздуха; количество осадков и т. д.); растительность; болотные зоны и типы болот	Влияют на формирование радиационно-теплового баланса поверхности, на формирование мощности толщ многолетнемерзлых пород и мощности слоя сезонного промерзания-протаивания; влияют на развитие геологических процессов и явлений

Таблица 2

Фрагмент матрицы некоторых показателей — характеристик тундровых ландшафтов п-ва Ямал

Провинции и подпровинции ландшафта	Номер ландшафта	Характеристика ландшафта	Геологическое строение	Абсолютные отметки, м	Мощность ММП, м	Температура ММП, °C	Льдистость за счет льда-племента и шиллерового льда, Л1	Льдистость за счет вторично-жильного льда, Л2
Арктическая, северо-тундровая подпровинция	3	Ландшафт III морской равнины, преобладают на юге плосколожбинные, на севере — средне-, мелкохолмистые и озерно-котловинные местности с мохово-лишайниково-ыми и кустарничковыми тундрами	Морские отложения III террасы. Супеси, пески с линзами торфа; на востоке лагунно-морские отложения — супеси, пески, суглинки, содержащие трубобломочечный материал, возраст QII ²⁻³	22—35	150—300	-7...-5	>0,4	0,05—0,2
Типичная средне-тундровая подпровинция	8	Ландшафт V морской равнины, преобладают мелко- и среднехолмистые слабозалегающие местности с кустарничковыми тундрами и фрагментами кустарниковых на суглинках и супесях	Морские и прибрежно-морские отложения салехардской свиты. Суглинки, реже супеси с прослойками песков, в большинстве районов верхняя часть разреза сложена песками, по всему разрезу встречен трубобломочечный материал, возраст QII ³⁻⁴	60—120	Более 300	Ниже -7	0,2—0,4	<0,05
Южная, южно-тундровая подпровинция	19	Ландшафт I морской равнины; преобладают озерно-болотные местности на востоке, на западе — хасырные и плосколожбинные местности с кустарничково- травяно-моховыми тундрами	Морские, на востоке лагунно-морские отложения I террасы. Суглинки, супеси, пески с включениями растительного детрита, на востоке с линзами торфа, возраст QIII—QIV	7—12	50—150	-5...-3	<0,4	—

между категориями сложности территории для отдельно взятого показателя оценки под углом зрения требований конкретной строительной отрасли будут различными.

Например, при автодорожном строительстве в условиях развития многолетнемерзлых пород (ММП) для выбора принципа использования грунтов в качестве основания под сооружение и определения категории грунтов важная роль принадлежит тепловой осадке ММП, возникающей в процессе оттаивания [7]. Известно, что ее величина зависит от механического состава грунтов, количества льда, его текстурных особенностей и форм залегания. Для расчета устойчивости полотна автодороги играет значимую роль гравитационная устойчивость или степень устойчивости склона, определяющаяся как соотношение сопротивления грунтов сдвигу к сдвигающим силам. Сопротивление грунтов сдвигу зависит от свойств грунта, сдвигающие силы растут с увеличением угла наклона поверхности и давления от возводимой насыпи.

Для каждого из названных показателей применительно для строительства автодорог определяются в соответствии с имеющимися нормативами граничные значения между типами оценочных категорий. Полученные категории необходимо отразить на карте. Количество показателей определяет и количество аналитических карт.

Методика их создания заключается в объединении в единую категорию различных операционных единиц (ландшафтов) согласно выбранным интервалам значения данного показателя. В интерактивном режиме эта процедура состояла в присвоении ландшафтам значений выбранных категорий сложности строительства. В результате формируется серия оценочных карт, каждая из которых записывается в цифровом виде на магнитные носители.

Полученные карты типологии ландшафтов образуют второй, своего рода отраслевой блок в информационно-карографической базе данных. Таких блоков можно создать множество на основе имеющихся данных (табл. 1) в зависимости от конкретных практических задач.

Выводы

1. На основании проведенного исследования отработана методика первичной обработки информации и ее занесение в информационно-карографическую базу данных. Методика апробирована для ключевого участка в южной части п-ва Ямал.

2. Отражена методика создания с помощью ЭВМ в полуавтоматическом режиме типологий ландшафтов по отдельным аналитическим параметрам оценки.

3. Полученные результаты позволяют в будущем разработать и обосновать оптимальную с различных точек зрения технологию создания комплексной карты оценки на основе классификации ландшафтов по набору параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5. Карта природных комплексов севера Западной Сибири (для целей геокриологического прогноза и планирования природоохранных мероприятий при массовом строительстве) масштаба 1 : 1 000 000 / Под ред. Е. С. Мельникова, Н. Г. Москаленко. М.: ВСЕГИНГЕО, 1991.
6. Карта растительности Западно-Сибирской равнины масштаба 1 : 1 000 000 / Под ред. С. И. Сачавы. М.: ГУК, 1986.
7. Методика мерзлотной съемки / Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1979. 206 с.
8. Трофимов В. Т., Баду Ю. Б., Кудряшов В. Г. и др. Полуостров Ямал. М.: Изд-во МГУ, 1972. 278 с.
9. Трофимов В. Т., Фирсов Н. Г., Баду Ю. Б. Экзодинамика Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во МГУ, 1986. 245 с.
10. Чистов С. В. Оценка геокриологических и геоморфологических условий области вечной мерзлоты для целей наземного строительства: Автограф. дис. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1986. 23 с.

МГУ

Поступила в редакцию
13.XII.1994

УДК 624.131

© 1996 г. В. Я. КАЛАЧЕВ

**НЕСОВЕРШЕНСТВО РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОЙ КОМПОНЕНТЫ НЕЗАСОЛЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПИКНОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
(ПО ГОСТу 5180-84)**

Анализируется расчетная формула плотности твердой компоненты незасоленного глинистого грунта при ее определении по ГОСТу 5180-84. Доказывается, что в стандартной формуле знаменатель, соответствующий объему твердой компоненты, завышен на величину объема прочносвязанной воды, образующейся на поверхности глинистых минералов в процессе проведения опыта и отличающейся по величине плотности от таковой воды в объеме.

Предлагается преобразованная формула расчета, учитывающая вышеприведенный недостаток стандартной. Сравниваются величины плотности, рассчитанные по стандартной и предлагаемой формулам и использованные затем при определении пористости, коэффициента пористости, деформационных параметров, а также интервалов времени отбора проб при проведении гранулометрического анализа грунтов. Ставится вопрос об изменении расчетной части действующего ГОСТА.

Согласно п.9 ГОСТа 5180-84 (Грунты. Методы лабораторных определений физических свойств грунтов) [1], расчет плотности твердой компоненты осуществляется по формуле:

$$\rho_s = \frac{\text{масса твердой компоненты грунта}}{\text{масса воды в объеме твердой компоненты грунта}} = \frac{g_0}{g_0 + g_3 - g_2} \rho_b, \quad (1)$$

где: g_0 — масса абсолютно сухой навески грунта, определяемая по формуле: $g_0 = g/(1 + 0,01W_g)$ (g — масса воздушно-сухой навески грунта, W_g — гигроскопическая влажность, %); g_3 — масса пикнометра с водой; g_2 — масса пикнометра с грунтом и водой; ρ_b — плотность воды, $\text{г}/\text{см}^3$.

Рассмотрим формулу (1). Исходя из определения плотности твердой компоненты как отношения массы твердой фазы грунта к ее объему, можно сказать, что числитель соответствует этому определению, так как здесь действительно имеет место масса твердой компоненты грунта. Иначе дело обстоит со знаменателем. Он должен быть равен объему твердой компоненты, который получают согласно формуле (1), поделив массу воды, взятой в объеме твердой фазы грунта, на ее плотность, равную $1 \text{ г}/\text{см}^3$ при температуре 20°C .

На самом деле уменьшающее знаменателя $g_0 + g_3$ — это суммарная масса абсолютно сухого грунта, воды в объеме пикнометра и самого пикнометра; вычитаемое знаменателя g_2 — сумма масс грунта, воды, оставшейся в пикнометре при помещении в него грунта, и самого пикнометра. Следовательно, разность между $g_0 + g_3$ и g_2 должна соответствовать объему твердой компоненты грунта при $\rho_b = 1 \text{ г}/\text{см}^3$.

И это справедливо для грубодисперсных грунтов (гравия, песка, супеси и т. п.). Поскольку если взять навеску абсолютно сухого грунта любой из этих разновидностей и поместить ее в пикнометр с водой, то она вытеснит из пикнометра

Таблица 1
Результаты расчетов плотности твердой компоненты глинистых грунтов по ГОСТу 5180-84
и с учетом прочносвязанной воды

Наименование грунта	Плотность твердой компоненты, $\text{г}/\text{см}^3$	
	Расчетная формула	
	по ГОСТу 5180-84	с учетом связанной воды
Глина гидрослюдистая ($W_g = 0,02$)	2,87	3,02
Глина каолиновая ($W_g = 0,01$)	2,70	2,78
Глина монтмориллонитовая ($W_g = 0,17$)	1,51	2,00
Суглинок полиминеральный засоленный ($W_g = 0,05$)	2,48	2,77
Суглинок полиминеральный покровный ($W_g = 0,02$)	2,61	2,72
Торф ($W_g = 0,1$)	1,30	1,46

объем воды, практически равный объему этой навески, так как объем, занимаемый гигроскопической влагой, присущей таким грунтам, пренебрежимо мал.

Иначе дело обстоит, если исследуются глинистые грунты. Здесь при помещении навески абсолютно сухого грунта в пикнометр с водой на границе раздела фаз мгновенно образуется оболочка прочносвязанной воды, плотность которой колеблется от $1,05$ до $1,20 \text{ г}/\text{см}^3$ [2], что отличается от плотности воды в объеме, а следовательно, из пикнометра будет вытеснен объем воды, больший объема собственно твердой компоненты на величину объема прочносвязанной воды. В связи с этим величины плотности твердой компоненты, найденные с учетом изменения ее объема при гидратации и без такового, заметно различаются (от нескольких сотых до нескольких десятых $\text{г}/\text{см}^3$) в зависимости от величины гигроскопической влажности (табл. 1).

Исходя из вышеприведенного, формула (1) для расчета плотности твердой компоненты грунта должна быть преобразована в следующий вид:

$$\rho_s = \frac{g_0}{(g_0 + g_3 - g_2)/\rho_b - (g - g_0)/\rho_{cb.b}}, \quad (2)$$

где $\rho_{cb.b}$ — плотность прочносвязанной воды. Вторая компонента в знаменателе соответствует объему, занимаемому прочносвязанной водой.

Таким образом, для того чтобы получить истинное значение плотности твердой компоненты глинистого грунта, знаменатель расчетной формулы (по ГОСТу 5180-84) должен быть уменьшен на величину объема, занимаемого прочносвязанной водой, образующейся на поверхности минеральных частиц в процессе их гидратации.

К сожалению, применение формулы (2) существенно усложняется необходимостью определения величины плотности прочносвязанной воды.

Дело в том, что в настоящее время не существует простого и быстрого метода нахождения этого параметра. Более того, до сих пор отсутствует единогласие о ее величине. И лишь комплексный подход (как это рекомендует П. П. Олодовский [2]) позволяет приблизиться к решению этой проблемы. Его исследования с использованием ИК-спектроскопии, ЯМР, парамагнитного резонанса, рентгено-

Таблица 2
Сравнительная характеристика параметров порового пространства и деформируемости грунтов, полученных с использованием общепринятой (1) и исправленной (2) расчетных формул

Название грунта	<i>n</i> , %		<i>e</i> , отн. ед.		<i>a</i> , отн. ед.		<i>E_{0k}</i> , МПа	
	расчетные формулы							
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Глина гидрослюдистая	36	40	0,61	0,66	0,029	0,033	28	20
Глина каолиновая	40	45	0,71	0,78	0,075	0,084	11	8
Глина монтмориллонитовая	28	45	0,37	0,80	0,035	0,060	38	12
Суглинок полиминеральный засоленный	36	41	0,57	0,62	0,027	0,033	27	22
Суглинок полиминеральный покровный	40	43	0,70	0,76	0,044	0,050	21	18

Таблица 3

Изменение интервалов взятия проб при производстве гранулометрического и микроагрегатного анализов глинистых грунтов (температура суспензии 20° С, интервал значений плотности твердой компоненты грунта 2,40—2,80 г/см³)

Размер частиц, мм	Изменение интервалов взятия проб при разных приращениях <i>ρ_s</i> , г/см ³		
	0,05	0,1	0,2
<0,05	2—5 с 3	7—9 с 7	12—16 с 9
<0,01	15—30 с 2	45—60 с 4	130—170 с 12
<0,005	2—3 мин 3	3—4 мин 3,5	8—9 мин 9
<0,001	35—50 мин 3	1 ч 10 мин—1 ч 30 мин 6	2 ч 30 мин—3 ч 11

Примечание: В числителе — абсолютное приращение времени, в знаменателе — % приращения.

янию. Таким образом, параметры порового пространства глинистых грунтов, получаемые до сего времени по вышеприведенным расчетным формулам, носят приближенный характер. Лишь введение в знаменатель формулы (2) второй компоненты позволяет получить их истинные значения.

О величине отклонений значений пористости, коэффициента пористости, коэффициента сжимаемости (*a*), компрессионного модуля деформации (*E_{0k}*), а также времени осаждения частиц грунта (*t*) в спокойной воде при определении гранулометрического состава, полученных с использованием значений *ρ_s* по ГОСТу 5180-84 и формуле (2), дают наглядное представление табл. 2 и 3. Как видно из табл. 2, расхождения между параметрами, рассчитанными с использованием формул (1) и (2), достаточно ощутимы, чтобы не принимать их во внимание.

О подобных же несоответствиях можно с уверенностью сказать и в случае использования истинных значений показателей плотности для расчета скорости

структурного анализа позволяют, с некоторой долей уверенности, судить о величине плотности прочносвязанной воды, адсорбирующейся на грунтовых частицах при значениях *P/P_s*, близких к 0,6, что соответствует парциальному давлению водяных паров в нормальных (20° С и 760 мм ртутного столба) условиях. Как оказалось, плотность прочносвязанной воды на частицах каолинита при этом составила 1,20 г/см³, а на частицах монтмориллонита — 1,05 г/см³.

Поскольку глинистые грунты в основной своей массе представлены полиминеральными смесями, а каолинит и монтмориллонит являются крайними по величине адсорбционной способности, то, вероятно, можно предположить, что плотность адсорбированной воды широко распространенных природных глинистых грунтов может быть оценена в 1,10—1,15 г/см³.

Разумеется, такое обоснование плотности прочносвязанной воды не является строгим, определенная погрешность все еще остается, но появляется надежда, что при разработке (в будущем) простого и надежного метода определения плотности адсорбированной воды достоверность найденных значений плотности твердой компоненты глинистого грунта возрастает.

Тем не менее уже сейчас необходимо внести изменения в расчетную часть ГОСТа 5180-84, поскольку полное игнорирование наличия прочносвязанной воды в глинистых грунтах и некоторое несоответствие ее плотности из-за сложности определения дают в конечном итоге несоизмеримые ошибки. На самом деле изменение, например, в расчетной формуле (2) значения плотности адсорбированной воды с 1,10 до 1,15 г/см³ дает приращение твердой компоненты гидрослюдистой глины (месторождение в Ленинградской области) всего лишь на 0,01 г/см³, а полное неприятие этого показателя, как это принято в ГОСТе, обусловливает уменьшение плотности на 0,15—0,16 г/см³. Такую картину можно наблюдать и при исследовании, например, глины юрского возраста (*J₃pu*) или верхнеплейстоценового покровного суглинка. Здесь эти приращения соответственно составляли 0,02 и 0,09 г/см³; 0,01 и 0,11 г/см³. Как видим, разница весьма существенна.

Известно, что знание величины плотности твердой компоненты грунтов в конечном итоге необходимо либо при проведении гранулометрического анализа грунтов, либо, что более важно, при расчете параметров их порового пространства: пористости и коэффициента пористости. Последние же являются расчетными компонентами деформируемости грунтов. Следовательно, от степени достоверности определения этого свойства глинистых грунтов зависит не только точность определения их классификационной принадлежности, но и уверенность в достоверности прогноза деформируемости оснований, сложенных этими грунтами.

Как известно, пористость грунтов (*n*) и коэффициент пористости (*e*) находятся из простых соотношений плотности твердой компоненты и плотности скелета грунта (*ρ_d*):

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}, \quad (3)$$

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}. \quad (4)$$

В свою очередь

$$\rho_d = \rho / (1 + 0,01 W_g), \quad (5)$$

где *ρ* — плотность грунта.

Как следует из формулы (5), плотность скелета грунта, полученная таким образом, характеризует абсолютно сухое его состояние, в то время как плотность твердой компоненты (*ρ_s*) в формулах (3) и (4), согласно формуле (1), соответствует некоторому промежуточному (между воздушно- и абсолютно сухим) его состо-

падения частиц грунта в спокойной воде, применяемой при проведении гранулометрических анализов, и в данном случае мы имеем дело с комплексом твердая грунтовая частица — квазитвердая пленка прочносвязанной воды, перемещающейся в воде в объеме под действием силы тяжести как единое целое. А это означает, что в параметре плотности твердой компоненты грунта, входящей в формулу Дж. Стокса, должна быть учтена и оболочка адсорбционной воды.

Однако при более внимательном рассмотрении методики определения показателей плотности грунтов и их последующего использования возникли следующие соображения.

По сложившейся традиции, при определении плотностных характеристик грунтов осуществляется учет их гигроскопической влаги. Строго говоря, такой подход оправдан и целесообразен, поскольку в этом случае можно получить истинные значения параметров.

В то же время возникает вопрос о соответствии их тем значениям, которые характерны для грунтов, используемых в качестве оснований, материалов или среды проектируемых инженерных сооружений. Если рассматривать грунты с этих позиций, можно констатировать, что: 1) грунты в массивах никогда не находятся в абсолютно сухом состоянии; 2) прочность связи молекул воды, адсорбированных на поверхности глинистых минералов, настолько высока, что теми реальными нагрузками, которыми сооружения воздействуют на грунт, она не может быть разрушена; 3) плотность категорий связанный воды с меньшими энергиями связи (полислойной адсорбции, осмотической и т. д.) практически не отличается от таковой воды в объеме.

Исходя из этого, можно утверждать, что в массиве глинистого грунта каждая его частица гидратирована и в процессе взаимодействия с сооружением ведет себя как единое целое с частью гидратной оболочки, представляющей прочносвязанную воду. Таким образом, отдельную частицу необходимо здесь рассматривать как жесткий комплекс, состоящий из минеральной компоненты и пленки прочносвязанной воды, который в массиве грунта в сложившемся температурно-напряженно-деформированном состоянии остается неизменным. Более того, кважижесткая гидратная составляющая этого комплекса занимает некоторый объем, уменьшая на его величину свободное поровое пространство.

Следовательно, искусственное изъятие гигроскопической влаги в процессе получения истинных значений показателей плотности (и соответственно пористости) приводит к искажению параметров, характеризующих реальное поровое пространство грунтов, в сторону их завышения.

Таким образом, мы имеем, с одной стороны, стремление исследователей получить истинные значения характеристик плотности грунтов с целью повысить достоверность прогнозных оценок поведения их под сооружением, а с другой — несоответствие истинных и реальных характеристик порового пространства с вытекающими отсюда расхождениями в величинах прогнозируемых и реальных показателей деформируемости.

Более того, и существующее нормативное обоснование методики сдвиговых испытаний может быть не совсем корректным из-за неопределенности параметров порового пространства.

По этой же причине возможна неверная классификация глинистых грунтов по результатам гранулометрического анализа (как пипеточного, так и ареометрического).

Таким образом, сложилась такая ситуация, когда, с одной стороны, для получения истинных значений плотностных характеристик необходимо использование сложнейших (но не всегда адекватных) методов определения плотности прочносвязанной воды, с другой — эти значения (плотностных характеристик) не в полной мере соответствуют реальному состоянию грунтов.

Выход из такого положения видится в нахождении и использовании в дальнейших расчетах таких параметров плотности, которые удовлетворяли бы последнему.

По нашему мнению, было бы более корректно в расчетной формуле по ГОСТу 5180-84 использовать величину навески не абсолютно сухого грунта, а воздушно-сухого. Тогда формула (1) будет выглядеть так:

$$\rho_s = \frac{g}{g + g_3 - g_2} \rho_v. \quad (6)$$

Это более строгое выражение, поскольку для грубодисперсных (песчаных, гравелистых и т. д.) грунтов связанная вода роли не играет (из-за незначительности), а для глинистых — массе воздушно-сухого грунта в числителе точно соответствует его объем в знаменателе.

Получаемое таким образом значение плотности твердой компоненты, по нашему мнению, будет интегрально характеризовать грунт и значительно полнее соответствовать его реальному поведению в основании сооружений.

Это названное нами рекомендованное значение плотности твердой компоненты и должно быть отражено в новом ГОСТе.

Автор отдает себе отчет о дискуссионном характере поставленной проблемы, но установление факта некорректности расчетной формулы нормативного документа, регламентирующего определение одного из важнейших показателей состава грунтов, не может быть оставлено без внимания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы определения физических свойств. М.: Госстандарт, 1984.
2. Олодовский П. П. Плотность адсорбированной воды // Инж. геология. 1989. № 1. С. 9—18.

МГУ

Поступила в редакцию
13.XII.1994

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА»

5—7 февраля 1996 года в Москве на геологическом факультете МГУ состоялась Международная научная конференция «Инженерная геология сегодня и завтра». На ней были рассмотрены фундаментальные проблемы современного состояния и перспективы развития инженерной геологии.

В конференции приняли участие 98 специалистов высших учебных заведений, академий наук, научно-исследовательских и производственно-научных институтов из Москвы, Санкт-Петербурга, Томска, Екатеринбурга, Иркутска и других городов России, а также Белоруссии и Китайской Народной Республики.

Конференцию открыл декан геологического факультета МГУ, проф. Б. А. Соколов, который указал на своевременность поставленных вопросов и пожелал участникам успешной работы.

Со вступительным словом выступил председатель оргкомитета, проф. В. Т. Трофимов. Он отметил, что тематика конференции была выбрана в связи с назревшей необходимостью обсуждения актуальных вопросов современного состояния и перспектив развития инженерной геологии, ее взаимосвязи с такими науками, как экологическая геология и геоэкология.

Перед заседанием было прочитано приветствие академика РАН Е. М. Сергеева участникам конференции.

На конференции работали три секции: 1 — содержание, структура и современные задачи инженерной геологии; 2 — прогноз развития инженерной геологии; 3 — инженерная геология, экологическая геология и геоэкология — соотношение содержания, объекта и задач.

По первой и второй секциям из 21 заявленных докладов было заслушано 15. Большой интерес и активное обсуждение вызвали доклады В. Т. Трофимова (МГУ) «Содержание, структура и современные задачи инженерной геологии»; Г. К. Бондарика (МГГА) «Современная инженерная геология. Содержание, структура, задачи»; В. В. Пендана (МГГА) «Инженерная геология — наука или искусство?»; Р. С. Зиангирова и Г. К. Бондарика (ПНИИС, МГГА) «Инженерная геология в начале третьего тысячелетия»; С. Д. Воронкевича (МГУ) «Инженерная геология и геохимия: состояние и перспективы взаимодействий»; И. В. Дудлера (МГСУ) «Развитие направлений инженерной геологии».

Обсуждение докладов по 1-ой и 2-ой секциям показало, что инженерная геология бесспорно является наукой геологического профиля, имеющая как фундаментальное, так и прикладное направления.

Очень активно прошла работа и дискуссия по третьей секции, на которой было заслушано 12 сообщений из 16 заявленных докладов. Среди сообщений, вызвавших наибольший интерес и активное обсуждение, можно отметить доклады В. Т. Трофимова и Д. Г. Зилинга (МГУ) «Инженерная геология, экологическая геология и геоэкология — соотношение содержания, объектов, предмета и задач», В. И. Осипова (ИГЦ РАН) «Геоэкология: понятия, задачи, приоритеты», Г. Л. Коффа (ИЛ РАН) «Геоэкология и экологическая ориентация традиционных наук геологического цикла», В. И. Макарова и др. (ИГЦ РАН) «Геопатогенные зоны — новый объект инженерной геологии и геоэкологии» и ряд других.

Обсуждение докладов показало, что среди ученых сегодня нет единого мнения по поводу соотношения содержания и задач инженерной геологии, экологической геологии и геоэкологии.

Подводя итоги в ходе общей дискуссии, участники конференции отметили, что инженерная геология в настоящее время в России и большинстве стран СНГ находится в кризисном состоянии. Это связано как с ничтожным финансированием научных инженерно-геологических исследований, так и с резким сокращением инженерно-геологических изысканий. Тем не менее, круг предметов исследований современной инженерной геологии постоянно расширяется, и это определяет тенденции ее развития в будущем. В последнее время инженерная геология все больше ставит и решает задачи экологического содержания.

По результатам работы конференции было принято решение, в котором, в частности, отмечается следующее.

1. Научному совету РАН по инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии рекомендовано обратиться в правительственные органы России с разъяснением сложившейся чрезвычайной ситуации в инженерной геологии. Недостаточное внимание к инженерно-геологическому и эколого-геологическому обоснованию строительства и эксплуатации природно-технических систем оборачивается тяжелейшими катастрофами и еще большим обострением экологического кризиса в России. Реализация программы устойчивого развития и безопасности России не может решаться при игнорировании научных достижений современной инженерной геологии. Аналогичные обращения рекомендовано направить от имени инженерно-геологических организаций других стран СНГ в свои правительственные органы.

2. Обратиться в правительство России и других стран СНГ, в РФФИ и другие национальные фонды с обоснованием необходимости последовательного увеличения, начиная с 1997 г. бюджетного финансирования фундаментальных научных исследований по инженерной геологии и экологической геологии с целью сохранения научного кадрового потенциала в этой области науки, предотвращения раз渲а материально-технической базы и сохранения пока еще передовой роли отечественной инженерной геологии в мире. Обратиться в РФФИ с обоснованием статуса и положения инженерной геологии в системе наук о Земле. Инженерную геологию, как науку, необходимо рассматривать в рамках геологии, а не горного дела.

3. С целью выхода инженерной геологии на новые рубежи необходимо расширить круг исследуемых задач, ориентированных на решение глобальных и региональных инженерно-геологических и эколого-геологических проблем, изучение закономерностей эволюции инженерно-геологических условий в эпоху техногенеза, геологическое обеспечение устойчивого развития общества.

4. Обратиться в Министерство по чрезвычайным ситуациям с разъяснением крайней необходимости более детального изучения геологических процессов как потенциальных источников природных катастроф. Для решения данных вопросов шире привлекать вузы, РАН, Роскомнедра, Минстрой России.

5. Обратиться в Главное управление технического нормирования Минстроя России с просьбой направлять в Научный совет РАН по инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии на рецензирование проекты всех нормативных документов для строительства, касающихся вопросов проектно-изыскательских работ, а также ОВОС и экологической экспертизы предпроектной и проектной документации.

6. Активизировать деятельность национальной группы инженер-геологов России, входящей в Международную ассоциацию инженер-геологов.

7. Просить Научный совет РАН по инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии включить в план работы проведение в 1997 г. в Екатеринбурге на базе Уральского горного института совещания по инженерно-геологическим и эколого-геологическим проблемам разработки месторождений полезных ископаемых.

В целом, проведенная конференция оказалась весьма полезной, а прошедший на ней обмен мнениями — плодотворным.

В. Н. Соколов, В. А. Королев

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР «КАЧЕСТВО ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ»

22 ноября 1995 г. в Москве в Московской Государственной Геологоразведочной Академии состоялся научный семинар «Качество геологической информации». Непосредственным организатором семинара была проблемная комиссия Научного совета РАН «Геоинформатика и геоинформационные системы» (председатель проф. Г. К. Бондарик, ученый секретарь проф. В. В. Пендин).

В работе семинара приняли участие специалисты ПНИИСа, ВСЕГИНГЕО и МГГА.

На семинаре было заслушано четыре заказных доклада.

В докладе Г. К. Бондарика были рассмотрены проблемы качества и оптимума инженерно-гео-

логической информации. Г. К. Бондарик подчеркнул, что основным продуктом инженерно-геологических изысканий является информация, обладающая фиксированным набором свойств. Оптимум информации — минимальный и необходим достаточный объем информации заданного качества. Г. К. Бондарик предложил различные методы оценки качества и количества информации.

В докладе В. В. Дмитриева, посвященном оценке и контролю качества инженерно-геологической информации, приведен анализ результатов оценки качества полевой и лабораторной информации в современных условиях. Анализ показал что: изменившиеся условия организации хозяйствственно-производственной деятельности в среднем привели к ухудшению качества результатов инженерно-геологического производства; в значительной мере ухудшение качества инженерно-геологической информации обусловлено нереальностью требований к внутрипроизводственной системе контроля качества результатов лицензируемой инженерно-геологической деятельности; необходимо внедрение системы метрологических поверок качества инженерно-геологических данных, основанной на использовании системы стандартных образцов; применение стандартных образцов позволяет сделать контроль качества инженерно-геологической информации действенным и реальным, а качество инженерно-геологических сведений соответствующим решаемым на их основе проектным, строительным и др. задачам.

В докладе Н. А. Миронова и Н. М. Хайме рассмотрены проблемы качества информации и значимых параметров при инженерно-геоэкологических исследованиях. Авторами выделены основные компоненты, которые должны быть охарактеризованы при инженерно-геоэкологических изысканиях: оценка техногенной нагрузки, радиационного загрязнения, химического загрязнения и экологических последствий развития экзогенных геологических процессов.

В докладе Н. А. Миронова и И. А. Саваренского проведено сравнение оценок закартированности массивов горных пород различными методами. Авторами рассмотрена информативность различных методов оценки закартированности территорий: аэрокосмическая съемка, геофизические методы, гидро-геохимические методы, петрографические методы, вскрытие поверхности закартированных пород.

В выводах отмечено, что наиболее информативным и достоверным методом оценки закартированности массивов является вскрытие пород.

В обсуждении приняли участие Е. М. Пашкин, В. В. Пендин, В. Л. Невечеря, Д. С. Дроздов и В. И. Кузькин.

По результатам семинара было принято решение, в котором отмечалось следующее:

1. Участники семинара обеспокоены современным состоянием контроля качества инженерно-геологических исследований.
2. Система лицензирования в области лабораторных инженерно-геологических исследований не отвечает современному уровню развития лабораторной базы, что существенно затрудняет производственную деятельность грунтоведческих лабораторий.
3. Достоверность методов прогноза экзогенных геологических процессов существенно ниже точности получения инженерно-геологической информации.

Г. К. Бондарик, В. В. Пендин

ПАМЯТИ ВАЛЕНТИНА МИХАЙЛОВИЧА ГОЛЬДБЕРГА

Отечественная наука понесла тяжелую, невосполнимую утрату. 15 февраля 1996 года скончался выдающийся ученый-гидрогеолог, заведующий лабораторией «Гидрогеоэкологии» Инженерно-геологического и геоэкологического научного центра Российской академии наук (ИГЦ РАН), доктор геолого-минералогических наук, профессор Валентин Михайлович Гольдберг. В 1995 г. Валентин Михайлович был избран членом-корреспондентом Международной Академии наук Евразии.

Валентин Михайлович Гольдберг родился 14 марта 1934 г. в Москве. Закончил геологоразведочный факультет Московского нефтяного института им. И. М. Губкина. Более 30 лет он работал в Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), где сформировал новое научное направление по изучению загрязнения и охране подземных вод, многие годы возглавлял лабораторию «Охраны подземных вод», создав школу учеников и последователей. В 1993 г. он перешел в ИГЦ РАН и организовал лабораторию «Гидрогеоэкологии».

Валентин Михайлович Гольдберг являлся крупнейшим специалистом в области изучения загрязнения подземных вод и обоснования их охраны, закачки опасных стоков в глубокие горизонты, безопасного размещения отходов, защиты водозаборных сооружений от загрязнения и подтягивания соленых вод, нефтяного загрязнения подземных вод и грунтов и их реабилитации, изучения проницаемости глин в зависимости от ряда факторов. Им разработаны комплексный подход к изучению загрязнения подземных вод во взаимосвязи с влиянием внешних природных сред, гидродинамические основы прогноза изменения качества подземных вод на водозаборных сооружениях, захоронения жидких отходов в глубоких горизонтах, методы прогнозов миграции загрязняющих веществ в подземных водах, оценки и картирования природной защищенности подземных вод от загрязнения, установлены закономерности изменения проницаемости глин в зависимости от температуры и физико-химических свойств растворов.

Огромное значение Валентин Михайлович придавал практическому внедрению своих научных разработок, обеспечению экологической безопасности крупных промышленных и агропромышленных производств.

Как ведущий специалист в области охраны подземных вод Валентин Михайлович Гольдберг широко известен за рубежом. Он выступал с докладами на многочисленных международных симпозиумах и конференциях, возглавлял группу советских экспертов на переговорах по оценке экологического ущерба в связи с выводом советских войск с территории Чехословакии и Венгрии. Под его научным руководством успешно защищено 28 кандидатских диссертаций. В течение многих лет читал курс лекций «Охрана подземных вод» в Московском геологоразведочном институте, являлся ведущим экспертом Минприроды РФ, автор свыше 210 научных работ, в том числе 14 монографий, важнейшими из которых являются:

«Поиски, разведка и оценка запасов линз пресных вод» (совместно с Бабушкиным В. Д., Глазуновым И. С.). М.: Недра, 1969. «Гидрогеологические прогнозы движения загрязненных подземных вод». М.: Недра, 1973, 170 с. «Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах». М.: Недра, 1976. 152 с. «Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие горизонты». М.: ВСЕГИНГЕО, 1976. 311 с. (с соавторами). «Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения» (совместно с С. Газдой). М.: Недра, 1984. 262 с. «Проницаемость и фильтрация в глинах» (соавтор Скворцов Н. П.). М.: Недра, 1986. 160 с. «Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды». Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 248 с. «Подземное захоронение промышленных сточных вод» (совместно с Скворцовом Н. П., Лукьянчиковой Л. Г.) М.: Недра, 1994. «Практическое пособие по охране подземных вод при орошении сточными водами» (совместно с Ивлевым В. В., Воробьевой Р. П.). М.: Изд-во Института Дружбы народов им. П. Лумумбы, 1995. 152 с.

Коллектив ИГЦ РАН и все знавшие Валентина Михайловича Гольдберга глубоко скорбят по поводу кончины блестящего ученого, крупного организатора науки и просто очень хорошего человека.

Редколлегия

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

Адрес редакции:

117810 Москва ГСП-1 Мароновский пер., 26

Телефон: 230-79-67

Заведующая редакцией А. А. Мазаева

Технический редактор Н. И. Демидова

Сдано в набор 25.04.96 Подписано к печати 06.06.96 Формат бумаги 70 × 100¹/16
Офсетная печать Усл. печ. л. 9,1 Усл. кр.-отт. 5,6 тыс. Уч.-изд. л. 11,0 Бум. л. 3,5
Тираж 606 экз. Зак. 4257

Адрес редакции: 117810 Москва ГСП-1 Мароновский пер., 26, тел. 230-79-67
Московская типография № 2 РАН, 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6

ФЕДЕРАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЧТОВОЙ СВЯЗИ ПРИ МИНИСТЕРСТВЕ СВЯЗИ РОССИИ

КАТАЛОГ'96

газеты, журналы,
книги, учебники

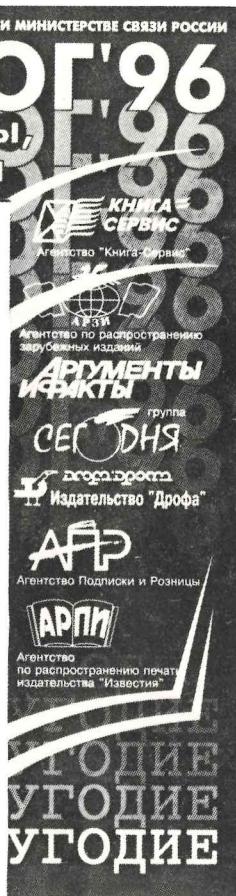
УВАЖАЕМЫЕ ПОДПИСЧИКИ!

Журналы Российской академии наук можно выписать в любом почтовом отделении России по сводному Каталогу Федерального управления почтовой связи ("ФУПС"). Академические журналы объявлены в этом каталоге в разделе "АРЗИ".

Обращаем Ваше внимание!

Подписку можно оформить и непосредственно в редакции журнала с любого очередного номера. Это избавит Вас от значительной части расходов: цены редакционной подписки существенно ниже! К тому же вышедший номер Вы сможете получить в редакции сразу после выхода его из печати.

Пользуйтесь предоставленной Вам возможностью льготной подписки!



«НАУКА»